

Projeto

# SMCBrasil

Sistema de Modelagem Costeira

## NÍVEIS E COTA DE INUNDAÇÃO



DOCUMENTO TEMÁTICO



**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

Presidente  
MICHEL TEMER

**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE**

Ministro  
EDSON DUARTE

**SECRETARIA EXECUTIVA**

Secretário-Executivo  
ROMEU MENDES DO CARMO

**SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE AMBIENTAL**

Secretário  
JAIR VIEIRA TANNÚS JUNIOR

**DEPARTAMENTO DE GESTÃO AMBIENTAL TERRITORIAL**

Diretor  
RAIMUNDO NONATO C. CORDEIRO FILHO

**COORDENAÇÃO-GERAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO**

Coordenador  
RÉGIS PINTO DE LIMA

Ministério do Meio Ambiente  
Universidade da Cantabria  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Universidade de São Paulo

Projeto SMC Brasil

# **NÍVEIS E COTA DE INUNDAÇÃO**

DOCUMENTO TEMÁTICO

Brasília  
MMA  
2018

© 2018 Ministério do Meio Ambiente – MMA  
Permitida a reprodução sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio, se citados a fonte do Ministério do Meio Ambiente ou sítio da Internet no qual pode ser encontrado o original em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes-mma>

Acordo de Cooperação Técnica Científica e Tecnológica nº 02/2011 entre os governos brasileiro e espanhol. Projeto "Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira". Financiado pela Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento – AECID, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão – MP, Universidade de São Paulo – USP e Universidade do Vale do Itajaí - Univali.

**COORDENAÇÃO TÉCNICA**  
Ministério do Meio Ambiente  
Coordenação-Geral de Gerenciamento Costeiro

Universidade da Cantabria  
Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria

Universidade Federal de Santa Catarina  
Laboratório de Oceanografia Costeira

Universidade de São Paulo  
Instituto Oceanográfico

**RESPONSÁVEIS TÉCNICOS**  
Ministério do Meio Ambiente  
Diego Pereira de Oliveira, Régis Pinto de Lima, Angelita de Souza Coelho, Salomar Mafaldo de Amorim Júnior, Bárbara Oliveira de Rezende, Mateus Pereira Rodrigues Borges, Rodrigo Cesar Azevedo Miguel.

Universidade da Cantabria  
Professor: Mauricio González (líder do projeto)  
Rodríguez, Raúl Medina, Omar Gutiérrez, Nabil Kakeh, Cynthia Martínez, Roland Garnier, Lara Ruiz, Jara Martínez, Verónica Canovas, Laura Ribas de Almeida, Belén López, Fernando Méndez, Antonio Espejo, Melisa Menéndez, Ana Abascal, Sonia Castanedo.

Universidade Federal de Santa Catarina  
Professor: Antonio Henrique da Fontoura Klein (líder do projeto), Clarissa Brelinger De Luca, Priscila Hoerbe Soares, Paula Gomes da Silva, Jonas Gomes Oliveira, Maiara Werner Pinto, Charline Dalinghaus, Caio Trajano Siqueira Salgado, Julia Gil dos Santos.

Universidade de São Paulo  
Professor: Moisés Gonzalez Tessler (líder do projeto), Samara Cazzoli y Goya.

Colaboração (Fornecimento de dados)  
Marinha do Brasil  
Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH)

Ministério do Meio Ambiente  
SEPN 505 – Bloco B  
Edifício Marie Prendi Cruz – sala 107  
Brasília - DF - Brasil - 70730-542

Nenhum dos participantes, nem as instituições as quais representam o desenvolvimento do SMC-Brasil, são responsáveis pela utilização dada a esta publicação.

A base de dados de ondas em águas profundas (GOW) e de níveis (GOT; GOS) incluída no SMC-Brasil são de propriedade do IH Cantabria. O SMC-Brasil permite o processamento e análise de tais dados ao longo da costa brasileira. Todavia, esses dados não estão disponíveis para os usuários do sistema, apenas o dado processado e analisado por cada usuário. O uso inadequado desses dados ou dos resultados obtidos a partir destes, bem como as ferramentas não são de responsabilidade do IH Cantabria ou do grupo que desenvolveu o projeto nem do MMA. Os usuários não podem utilizar técnicas de engenharia reversa, descompilar ou fazer o *download* da base de dados de ondas e níveis do *software* SMC-Brasil.

**Foto da Capa**  
Autor: Marco Silva/Futura Press  
Cedida por: O Estado de S. Paulo  
Local: Praia de Santos

#### Dados Internacionais para Catalogação na Publicação - CIP

---

P964s Projeto SMC-Brasil : níveis e cota de inundação : documento temático [recurso eletrônico] / Ministério do Meio Ambiente ... [et al.]. -- Brasília-DF: MMA, 2018.  
129 p. : il. (algumas color.) ; gráficos, tabelas.  
ISBN: 978-85-7738-358-0 (*on line*)  
Modo de acesso: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/>

1.Nível do mar. 2.Maré astronômica. 3.Maré meteorológica. 4.Cota de inundação. I I.Ministério do Meio Ambiente. II.Universidade de Cantabria. III.Universidade Federal de Santa Catarina. IV.Universidade de São Paulo. V.Título.

CDU: 502(210.5:81)

---

Biblioteca Ministério do Meio Ambiente  
Maria Ivana. CRB 1/1556

# Apresentação

Cerca de 25% da população brasileira vive na zona costeira e para isso, o conhecimento deste território é imprescindível para os gestores públicos e sociedade frente às mudanças do clima e amortecimento dos eventos extremos que a costa vem sofrendo.

Com o intuito de divulgar o conhecimento dessa parte do território tão complexa e rica, o Projeto Sistema de Modelagem Costeira - SMC-Brasil, fruto de acordo entre os governos Espanhol e Brasileiro, gerou um conjunto de 05 documentos temáticos que tratam de conceitos relacionados à inundação costeira, bem como das metodologias de cálculo e análise desse processo na costa brasileira, e 08 Manuais Técnicos para apoiar a instrumentalização dos gestores costeiros e promover a adequada transferência de conhecimento desejada no Projeto SMC-Brasil.

Esses 13 (treze) documentos estão com orientações e instruções para proposição de projeto de proteção da linha de costa e informações relevantes que podem orientar e apoiar os instrumentos de ordenamento territorial previstos no Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro.

Dessa forma, essas publicações que têm por objetivo principal prover o acesso a ferramentas que permitam melhorar e qualificar a tomada de decisão por parte de gestores e administradores das três esferas de governo na gestão da linha de costa, auxiliando nos processos de autorização e permissão de uso de bens e imóveis da União, licenciamento, zoneamento.

Além disso, esses documentos permitirão avaliar os problemas de impacto ambiental associados a obras e intervenções costeiras, delimitação de zonas de domínio público e privado ao longo do litoral, favorecendo à recuperação espaços públicos já ocupados, e proteção às populações assentadas em áreas com risco de inundações.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>18</b>
1.1. Marco do Documento .....	18
1.2. Limitações do Uso do Documento .....	22
1.3. Estrutura do Documento .....	22
1.4. Escopo do Documento .....	23
<b>CAPÍTULO 2: BASES DE DADOS DE NÍVEIS INCLUÍDAS NO SMC-BRASIL</b> .....	<b>24</b>
<b>2. Bases de Dados de Níveis incluídas no SMC–Brasil</b> .....	<b>25</b>
2.1. Introdução .....	25
2.2. Base de dados da maré astronômica .....	25
2.2.1. Introdução .....	25
2.2.2. A maré astronômica .....	25
2.2.2.1. O que é a maré astronômica? .....	25
2.2.2.2. Como se gera a maré astronômica? .....	26
2.2.2.3. Como a maré astronômica se comporta nos oceanos? .....	31
2.2.2.4. Como se pode determinar a maré astronômica? .....	31
2.2.2.5. Para que é utilizada a maré astronômica no SMC – Brasil? .....	36
2.2.3. Metodologia empregada para se gerar a base de dados da maré astronômica no SMC – Brasil .....	37
2.2.4. Descrição da base de dados da maré astronômica no SMC-Brasil .....	39
2.2.5. Validação da base de dados GOT .....	39
2.2.5.1. Dados disponíveis para validação .....	39
2.2.5.2. Metodologia de validação .....	41
2.2.5.3. Resultados .....	42
2.2.5.4. Conclusões da Validação .....	50
2.2.6. Caracterização da base de dados GOT disponível no SMC-Brasil .....	50
2.2.7. Conclusões .....	54
2.2.8. Limitações da base de dados .....	54

2.3. Base de dados da Maré Meteorológica .....	54
2.3.1. Introdução.....	54
2.3.2. A maré meteorológica .....	55
2.3.2.1. O que é a maré meteorológica? .....	55
2.3.2.2. Como é gerada a maré meteorológica? .....	55
2.3.2.3. Como se comporta a maré meteorológica nos oceanos? .....	57
2.3.2.4. Como se pode determinar a maré meteorológica? .....	57
2.3.2.5. Para que se utiliza a maré meteorológica no SMC-Brasil? .....	58
2.3.3. Metodologia utilizada para gerar a base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil.....	58
2.3.4. Descrição da base de dados de maré meteorológica no SMC-Brasil.....	60
2.3.5. Validação da base de dados de maré meteorológica .....	61
2.3.5.1. Dados disponíveis para a validação .....	62
2.3.5.2. Metodologia de validação .....	62
2.3.5.3. Resultados da validação .....	63
2.3.5.4. Conclusões da validação .....	66
2.3.6. Caracterização de maré meteorológica na costa do Brasil .....	66
2.3.7. Conclusões .....	70
2.3.7.1. Limitações da base de dados .....	71
<b>CAPÍTULO 3: NÍVEL DA MARÉ E COTA DE INUNDAÇÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>3. Nível da Maré e Cota de Inundação .....</b>	<b>73</b>
3.1. Introdução.....	73
3.2. Nível de maré e cota de inundação .....	73
3.3. Metodologia de cálculo.....	74
3.3.1. Bases de dados empregadas.....	74
3.3.1.1. Batimetrias.....	74
3.3.1.2. Maré astronômica .....	74
3.3.1.3. Maré meteorológica .....	75
3.3.1.4. Ondas .....	75
3.3.2. Procedimento de cálculo.....	75
3.3.3. Implementação no SMC-Brasil e exemplo dos resultados obtidos.....	76
3.4. Diferença entre a cota de inundação obtida no SMC-Brasil e as encontradas no documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017) .....	82
3.5. Conclusões .....	84
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>90</b>
<b>1. Validação da Base de Dados da Maré Astronômica .....</b>	<b>90</b>
1.1. Introdução .....	90
1.2. Objetivo .....	90
1.3. Dados disponíveis .....	90
1.3.1. Base de dados de níveis de maré astronômica, SMC-Brasil.....	90
1.3.2. Marégrafos.....	93
1.4. Metodologia de validação .....	95
1.4.1. Parâmetros estatísticos estudados .....	96
1.4.2. Função de distribuição .....	97
1.5. Resultados .....	97
1.5.1. Marégrafos localizados na costa .....	97
1.5.2. Marégrafos localizados em mar aberto .....	119
1.5.3. Marégrafos localizados em estuários .....	122
1.6. Conclusões.....	124
1.7. Agradecimentos .....	124
<b>Anexo 2: METODOLOGIAS DE CÁLCULO DO REGIME EXTREMO.....</b>	<b>125</b>
<b>2. Metodologia de Cálculo do Regime Extremo .....</b>	<b>125</b>
2.1. Metodologia de cálculo do regime extremo na costa .....	125
2.1.1. Seleção de valores extremos.....	125
2.1.2. Método de ajuste do modelo.....	127
2.1.3. Períodos de retorno .....	127
<b>Anexo 3: ARTIGOS CIENTÍFICOS DE INTERESSE PARA O DOCUMENTO .....</b>	<b>129</b>
<b>3. Artigos Científicos de Interesse para o Documento .....</b>	<b>129</b>

# Lista de Figuras

Figura 1:	Fluxograma esquemático do Projeto SMC-Brasil. ....	20
Figura 2:	Descrição de uma onda típica de maré. ....	26
Figura 3:	Sistema Terra-Lua. T = Terra; L = Lua; CT = Centro da Terra; CM = Centro de Massa. ....	27
Figura 4:	Distribuição das forças motrizes da maré astronômica. ....	28
Figura 5:	Superfície de equilíbrio da elevação do mar (exagerada) devido ao equilíbrio das forças de tração do sistema Terra-Lua. ....	29
Figura 6:	Posição dos astros no caso de marés de quadratura e de sizígia. ....	30
Figura 7:	Mapa de (a) amplitude (cm) e (b) fase ( $^{\circ}$ ) da componente $M_2$ da maré astronômica. Fonte: Pugh (2004). ....	32
Figura 8:	Deformação do perfil da onda de maré e formação de sobre-marés. ....	34
Figura 9:	Esquema da variação do ponto de ruptura de um estado do mar com altura H, em função do nível de maré astronômica sobre o qual ocorre a propagação. ....	37
Figura 10:	Pontos selecionados para se gerar a base de dados da maré astronômica do SMC-Brasil. ....	38
Figura 11:	Mapa da componente de maré $M_2$ calculada com o modelo TPXO. Fonte: <a href="http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html">http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html</a> . ....	39
Figura 12:	Marégrafos encontrados na base de dados da página web da UHSLC localizados na costa do Brasil. ....	40
Figura 13:	Marégrafos da base de dados da Marinha do Brasil/DHN localizados na costa do Brasil. ....	41
Figura 14:	Validação da base de dados GOT com o marégrafo h27A da base de dados da UHSLC. ...	43
Figura 15:	Validação da base de dados GOT com o marégrafo h202B da base de dados da UHSLC. .	44
Figura 16:	Validação da base de dados GOT com marégrafo h719A da base de dados da UHSLC. ....	44
Figura 17:	Validação da base de dados GOT com o marégrafo h599A da base de dados da UHSLC. .	45
Figura 18:	Diagrama de dispersão nos pontos de validação. É apresentado também a comparação quantil-quantil, o viés (BIAS), o coeficiente de correlação $R^2$ , o coeficiente de correlação de Pearson (CORR) e o erro quadrático médio (RMSE). ....	46
Figura 19:	Validação da base de dados GOT com o marégrafo 30225 da base de dados da Marinha do Brasil. ....	48
Figura 20:	Validação da base de dados GOT com o marégrafo 30725 da base de dados da Marinha do Brasil. ....	49
Figura 21:	Validação da base de dados GOT com o marégrafo 60250 da base de dados da Marinha do Brasil. ....	49

<b>Figura 22:</b> Funções de distribuição da elevação da maré astronômica ao longo da costa do Brasil. Se mostram 3 exemplos, ao a) norte, b) centro e c) sul da costa. Se observa como a elevação da maré diminui de norte a sul. ....	51
<b>Figura 23:</b> Elevação máxima da onda da maré astronômica obtida na base de dados GOT do SMC-Brasil. Elevações em metros. ....	52
<b>Figura 24:</b> Amplitude da maré astronômica máxima e percentuais de 99%, 95%, e 50% da amplitude de maré astronômica, obtidas na base de dados GOT do SMC-Brasil. Amplitude em metros.....	53
<b>Figura 25:</b> Exemplo de série de nível do mar registrada por um marégrafo (acima), a maré astronômica (centro) e a maré meteorológica (abaixo). ....	58
<b>Figura 26:</b> Batimetria utilizada na elaboração de reanálise de maré meteorológica na zona de estudo. Malha 1 (resolução: 0,25°).....	59
<b>Figura 27:</b> Resultados da reanálise GOS de elevação da superfície livre decorrente da maré meteorológica para a data 17/12/1992, 5:30. Golfo do México e Caribe. ....	60
<b>Figura 28:</b> Resultados da reanálise GOS de elevação da superfície livre decorrente da maré meteorológica para a data 17/12/1992, 6:15. América do Sul.....	60
<b>Figura 29:</b> Pontos selecionados para a geração da base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil.....	61
<b>Figura 30:</b> Localização dos marégrafos utilizados na validação da base de dados GOS na costa Brasileira.....	62
<b>Figura 31:</b> Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h280A (1970-2006). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil e resultados estatísticos. ....	64
<b>Figura 32:</b> Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h281A (1986-2005). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil, e resultados estatísticos. ....	64
<b>Figura 33:</b> Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h718A (2001-2007). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil, e resultados estatísticos. ....	65
<b>Figura 34:</b> Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h719A (1970-2006). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil, o viés (BIAS) e os resultados estatísticos. ....	65

Figura 35: Elevação máxima da maré meteorológica obtida na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevação em metros.....	67
Figura 36: Elevação média da maré meteorológica obtida na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevação em metros.....	68
Figura 37: Desvio padrão da elevação da maré meteorológica obtida na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevação em metros.....	69
Figura 38: Elevações dos percentuais de 99%, 95%, e 90% da maré meteorológica, obtidas na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevações em metros. ....	70
Figura 39: Fatores que afetam a cota de inundação.....	74
Figura 40: Exemplo de área de trabalho. Indica-se a posição do ponto de onda DOW utilizado para propagar a onda à costa.....	76
Figura 41: (a) Histograma de maré astronômica e (b) maré meteorológica associadas ao ponto A. ...	77
Figura 42: Exemplo de desenho de perfis na área de trabalho. Mostra-se em particular o local em que as propriedades do perfil 2 são indicados: Tamanho médio de sedimento, densidade e declividade do perfil. ....	78
Figura 43: Perfis da área de trabalho indicando a posição e frequência de quebra. Os círculos em tons escuros indicam as maiores frequências. ....	79
Figura 44: (a) Histograma de ocorrência de <i>runup</i> e (b) regime extremo de <i>runup</i> para o perfil 2. ....	80
Figura 45: Exemplo de resultados estatísticos de cota de inundação obtidos pelo SMC-Brasil. (a) Seção da série temporal, (b) Histograma de ocorrência, (c) Regime médio e (d) Regime extremo.....	81
Figura 46: Esquema representativo da determinação de contornos de inundação para diferentes períodos de retorno a partir dos regimes extremos de cota de inundação associados a perfis.....	82
Figura 47: Mapa da componente de maré M2 calculada com o modelo TPXO. Fonte: <a href="http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html">http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html</a> .....	91
Figura 48: Localização dos pontos de dados de maré astronômica incluídos no SMC-Brasil. ....	92
Figura 49: Localização de marégrafos ao longo da costa do Brasil.....	94
Figura 50: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 20520.....	98
Figura 51: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30225.....	99
Figura 52: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30337.....	100
Figura 53: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30540.....	101
Figura 54: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30725.....	102
Figura 55: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40135.....	103
Figura 56: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40140.....	104

Figura 57: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40219.....	105
Figura 58: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40252.....	106
Figura 59: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40255.....	107
Figura 60: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50116.....	108
Figura 61: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50127.....	109
Figura 62: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50141.....	110
Figura 63: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50159.....	111
Figura 64: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50165.....	112
Figura 65: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50205.....	113
Figura 66: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60132.....	114
Figura 67: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60135.....	115
Figura 68: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60139.....	116
Figura 69: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60250.....	117
Figura 70: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60370.....	118
Figura 71: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30950.....	121
Figura 72: Localização dos marégrafos dentro dos estuários. ....	122
Figura 73: Função de distribuição das séries de níveis de marés astronômicas medidas pelo marégrafo e contidas na base de dados do SMC-Brasil. ....	123
Figura 74: Funções de densidade e distribuição da GEV para diferentes tipos de parâmetros de forma. ....	126

# Lista de Quadros

Quadro 1: Principais componentes harmônicas da maré astronômica.....	33
Quadro 2: Lista das principais sobre-marés e marés compostas.....	35
Quadro 3: Características das séries de dados dos marégrafos. Classe dos marégrafos: (I) Marégrafos localizados em Interiores ou estuários; (C) Marégrafos na Costa e; (E) Marégrafos Externos ou distantes da costa. ....	47
Quadro 4: Diferenças na metodologia empregada para o cálculo da cota de inundação entre o SMC-Brasil e o documento “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil” (MMA, 2017).....	83
Quadro 5: Características das séries de dados dos marégrafos. ....	95
Quadro 6: Resumo dos indicadores. ....	119
Quadro 7: Distância entre os marégrafos localizados em mar aberto e o ponto mais próximo da base de dados do SMC-Brasil. ....	120
Quadro 8: Resumo dos indicadores. ....	120
Quadro 9: Resumo dos indicadores. ....	123

# Lista de Abreviaturas

ABC – Agência Brasileira de Cooperação

AECID – Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento

AM – Amplitude da Maré

C – Marégrafos na costa

CEPAL – *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*

CI – Cota de Inundação

CM – Centro de Massa

CORR – Coeficiente de Correlação de Pearson

CT – Centro da Terra

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

E – Marégrafos externos ou distantes da costa

ETOPO2 – *2 Minute Gridded Global Relief Data*

GEV – Função Generalizada de Extremos (*Generalized Extreme Value*)

GOS – *Global Ocean Surge*

GOT – *Global Ocean Tides*

I – Marégrafos interiores ou em estuários

IABS – Instituto Ambiental Brasil Sustentável

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IH – Instituto Hidráulico

INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias

L - Lua

MA – Maré Astronômica

MDA – Análise Discriminante Múltipla (*Multiple Discriminant Analysis*)

MLE – Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation*)

MM – Maré Meteorológica

MMA – Método de Máximos Anuais

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MP – Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão

NCEP/NCAR – *National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*

NE – Nordeste

NM – Nível do Mar

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

RMSE – Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error*)

ROMS – *Regional Ocean Modeling System*

RU – *Runup*

SEDR – Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável

SI - Índice de Dispersão (*Scatter Index*)

SLP - Pressão ao nível médio do mar (*Sea Level Pressure*)

SMC – *Sistema de Modelado Costero / Sistema de Modelagem Costeira*

SPU – Secretaria do Patrimônio da União

SW – Sudoeste

SWL – Nível Médio do Mar

T – Terra

SPU – Secretaria do Patrimônio da União

UC – Universidade da Cantabria

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UHSLC – Centro do Nível do Mar da Universidade do Haváí

USP – Universidade de São Paulo

# Lista de Símbolos

- $a_0$  – Amplitude do nível médio do mar
- $a_n$  – Amplitude de k componentes
- $A_n$  – Amplitude das componentes senoidais da componente considerada com a frequência  $\omega_n$
- $b$  – Coeficiente de ajuste da reta
- $B_n$  – Amplitude das componentes cossenoidais da componente considerada com a frequência
- $c$  – Velocidade de fase da onda
- $F$  – Função de distribuição não degenerada
- $g$  – Aceleração da gravidade
- $G$  – Função de distribuição de valores extremos
- $h$  – Horas
- $h$  – Profundidade do oceano
- $H$  – Altura da coluna de água
- $H$  – Profundidade
- $H_b$  – Altura significativa de onda na quebra
- $k$  – Coeficiente
- $K_1$  – Componente Luni-Solar Diurna
- $K_2$  – Componente Luni-Solar Semidiurna
- $L_0$  – Comprimento da onda em profundidades indefinidas
- $L_2$  – Componente Lunar Elíptica Menor Semidiurna
- $m$  – Inclinação da reta de ajuste
- $m$  – Número total de anos disponíveis
- $M_1$  – Componente Lunar Elíptica Menor Diurna
- $M_2$  – Componente Lunar Principal Semidiurna
- $M_f$  – Componente Lunar Quinzenal
- $M_m$  – Componente Lunar Mensal
- $N_2$  – Componente Lunar Elíptica Maior Semidiurna
- $2N_2$  – Componente Lunar Elíptica 2º ordem
- $O_1$  – Componente Lunar Principal Diurna
- $P_a$  – Pressão atmosférica
- $P_a(x)$  – Pressão a um ponto de distância x do centro da tormenta
- $P_e$  – Pressão do lado externo da tormenta
- $P_0$  – Pressão no centro da tormenta

$P_1$  – Componente Solar Principal Diurna  
 $Q_1$  – Componente Lunar Elíptica Maior Diurna  
 $r$  – Coeficiente de correlação de Pearson  
 $R$  – Período de retorno  
 $R$  – Raio da tormenta  
 $R(t)$  – *Runup*  
 $R_m$  – *Runup* médio  
 $R_s$  – *Runup* significativo  
 $R_{2\%}$  – *Runup* superado em 2% dos casos  
 $R^2$  – Porcentagem de ajuste entre duas variáveis  
 $S_{sa}$  – Componente Solar Semestral  
 $S_2$  – Componente Solar Principal Semidiurna  
 $t$  – Tempo  
 $\tan \beta$  – Declividade da praia  
 $T_2$  – Componente Solar Elíptica Maior Semidiurna  
 $T$  – Período  
 $W$  – Velocidade do vento  
 $x$  – Distância horizontal sobre a qual sopra o vento  
 $Z_n$  – Sequência de números reais  
 $\alpha$  – Fase da onda  
 $\alpha_n$  – Fase de  $k$  componentes  
 $\eta$  – Elevação da superfície livre do nível do mar  
 $\eta(t)$  – Série de nível do mar medida  
 $\eta_v$  – Elevação do nível do mar  
 $\mu$  – Parâmetro de localização  
 $\xi$  – Parâmetro de forma  
 $\rho$  – Coeficiente de correlação da reta bissetriz  
 $\rho$  – Densidade da água do mar (1026 kg/m<sup>3</sup>)  
 $\tau_b$  – Tensão tangencial devido ao atrito com o fundo do oceano  
 $\tau_s$  – Tensão tangencial devido ao vento  
 $\psi$  – Parâmetro de escala  
 $\Omega_L$  – Velocidade angular da Lua  
 $\Omega_S$  – Velocidade angular do Sol  
 $\Omega_T$  – Velocidade angular da Terra  
 $\omega_n$  – Frequência da componente

# CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

# 1. Introdução

## 1.1. Marco do Documento

A Zona Costeira brasileira é uma região de alta densidade populacional para a qual convergem grande parte dos investimentos, infraestruturas e fluxos econômicos preponderantes no país. A vulnerabilidade natural da zona costeira é relevante ao bem-estar da população e ao crescimento econômico do país, onde impactos se potencializam frente aos efeitos das mudanças do clima.

O Projeto Orla estabeleceu uma faixa de gestão da zona costeira com a finalidade de identificar uma possível linha de segurança da costa, abrangendo as áreas de grande dinamismo geomorfológico (com tendências de transgressão ou regressão marinhas), cobrindo espaços de desequilíbrio em termos de processos morfogenéticos e hidrodinâmicos.

Cerca de 40% da costa brasileira tem problema de erosão, sendo os seus efeitos mais significativos nas regiões urbanizadas (MMA, 2006). Embora a urbanização em si não provoque erosão, as edificações e construções dentro da faixa de resposta da dinâmica da praia às tempestades tendem a ser retomadas pelo mar, se tratando, portanto, de ocupações em áreas de risco a erosão e inundação (MMA, 2006).

Quando se trata de obras de engenharia costeira e sua interação com os instrumentos de gestão ambiental é importante considerar que as intervenções costeiras devem sempre ser avaliadas sob a ótica da unidade fisiográfica em que se inserem. Obras isoladas em áreas costeiras devem ser evitadas, sendo necessário favorecer as ações conjuntas em unidades fisiográficas definidas, em planos e projetos envolvendo União, estados e municípios, a exemplo do próprio Projeto Orla.

Em 2000, no I Simpósio Brasileiro sobre Praias Arenosas, bem como em 2008, no I Simpósio Nacional sobre Erosão Costeira, que reuniu academia e gestores, foi identificado como desafio vencer a falta de conhecimento sobre os processos litorâneos, que moldam a costa brasileira (ondas, marés, batimetria, ventos, entre outros), que permitisse uma melhor caracterização de fenômenos ou tendências erosivas ao longo do litoral. Também foi apontada a necessidade urgente de formar profissionais especializados em processos litorâneos e em obras e intervenções na costa, na perspectiva de qualificar os projetos de intervenção, melhorando o processo de tomada de decisão e assegurando a proteção da linha de costa.

No evento foi apresentada a experiência da Espanha nas ações de gestão costeira para proteção da linha de costa, estruturadas a partir de um programa contínuo de formação e na instrumentalização para tomada de decisão (MMA, 2013). Na Espanha, o “Modelo de Ajuda para a Gestão do Litoral” inclui o “*Sistema de Modelado Costero*” (SMC), composto por um conjunto de ferramentas que permite o estudo, desenho e elaboração de alternativas para projetos de engenharia costeira.

O processo de avaliação e implementação de obras de recuperação da linha de costa espanhola utilizando o SMC acumula uma experiência de mais de 15 anos, a partir da parceria entre o governo espanhol e o Instituto Hidráulico da Universidade da Cantabria (IH Cantabria). O programa de gestão envolve a produção de conhecimento para tomada de decisão, considerando a dinâmica natural, a gestão da costa e a gestão urbana. Esse processo envolveu a reapropriação de áreas de

domínio público e indenização a particulares. A iniciativa foi uma resposta ao acelerado processo de urbanização experimentado pela Espanha nos anos 70, que fundamentou a Lei da Costa em 1988. A estratégia foi a de atuar na gestão de conflitos no litoral, de forma a garantir a defesa da costa, *habitats* de fauna e flora e a ocupação humana. Além de atender às demandas de resoluções e diretivas da União Européia, a exemplo da gestão costeira integrada e, posteriormente, a de avaliação de risco à inundação.

Motivados por essa experiência, em 2010, os governos brasileiro e espanhol estabeleceram o Acordo de Cooperação Técnica, Científica e Tecnológica para executar o Projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira” entre a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), com a participação do Ministério do Meio Ambiente através da Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável (MMA/SEDR), da Secretaria do Patrimônio da União e do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão (SPU/MP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), da Universidade de São Paulo (USP), da Universidade da Cantabria (UC-IH Cantabria/Espanha) e do Instituto Ambiental Brasil Sustentável (IABS). O objetivo era contribuir para a melhoria da gestão de implementação de obras costeiras no Brasil, a partir de insumos que incentivassem o entendimento e a proposição de soluções a problemas de erosão costeira e seus impactos ambientais, promovendo a recuperação da funcionalidade dos espaços públicos já ocupados e protegendo as populações em áreas de risco.

O projeto, denominado SMC-Brasil, gerou um conjunto de publicações para apoiar estudos de processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais ou de atuações humanas na costa. O material é voltado para os gestores costeiros e academia, apresentando os referenciais teóricos para entendimento da dinâmica costeira e construção de cenários da linha de praia. Essas informações são importantes para o planejamento e qualificação da tomada de decisão da orla marítima. O conjunto de documentos é composto por:

- i. Estudo “*Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil*” que tem como objetivo disponibilizar informações sobre a faixa de inundação e nível do mar ao longo de toda a costa brasileira.
- ii. Documentos Temáticos com objetivo de apresentar e detalhar metodologias de projeto para diversas atuações na costa, incluindo as metodologias para o pré-tratamento dos dados de dinâmicas marinhas (ondas e níveis do mar).
- iii. Manuais de Modelos Numéricos usados na ferramenta SMC-Brasil com objetivo de disponibilizar a base de dados das cartas batimétricas e dinâmicas marítimas (ondas e nível do mar) ao longo da costa brasileira; e oferecer um pacote de programas numéricos que permita a correta utilização da metodologia proposta nos Documentos Temáticos.

Os conteúdos apresentados no conjunto de documentos sintetizam a transferência de conhecimento da experiência espanhola que são de grande valia para o debate e o desenvolvimento de ações costeiras no Brasil relacionado à dinâmica da praia. Ressalta-se que os documentos estão centrados em praias de sedimento inconsolidado (areia, cascalho) localizadas em zonas abertas, nas quais a ondulação é a dinâmica predominante. Por isso, é importante compreender que existem limitações nos dados adquiridos e nos resultados alcançados, já que foram assumidas algumas

simplificações metodológicas. Para que o usuário utilize corretamente as informações contidas nesses documentos, em especial no presente documento, deve-se levar em consideração as limitações apresentadas na seção 1.2 deste capítulo.

### O Projeto SMC-Brasil

O Projeto SMC – Brasil tem como componentes fundamentais a formação de pessoal e a instrumentalização de gestores públicos em técnicas de proteção e gestão do litoral que facilite a tomada de decisões. A proposta é apresentar subsídios que possam apoiar a construção de um modelo que auxilie na dinamização e qualificação de procedimentos de licenciamento ambiental e de planejamento territorial, avaliando os impactos de obras na zona costeira (Figura 1).

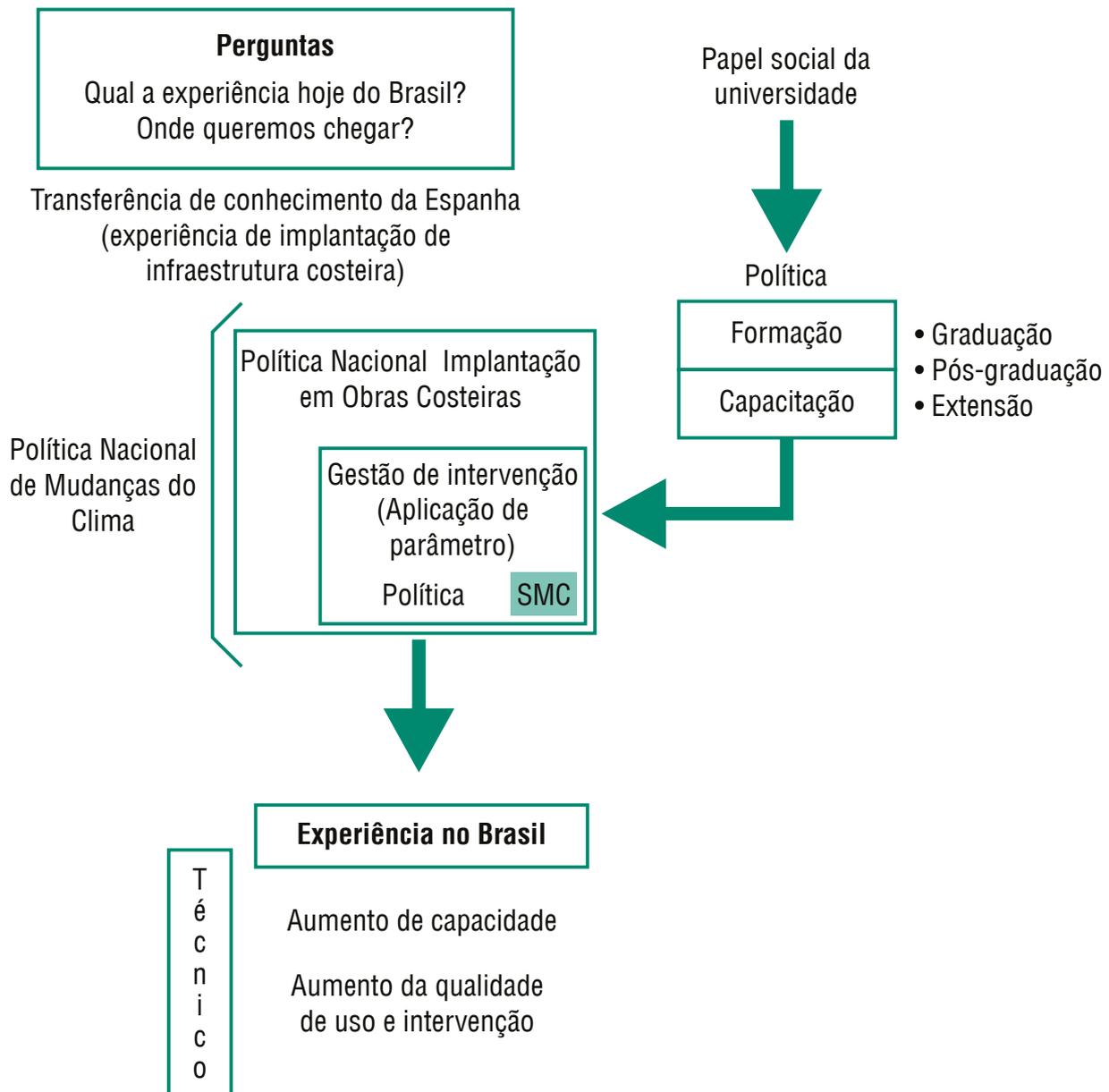


Figura 1: Fluxograma esquemático do Projeto SMC-Brasil.

A ferramenta computacional SMC-Brasil combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na

zona costeira. As metodologias permitem abordar o estudo de um problema de forma sistemática, respondendo perguntas sobre dados de entrada, escalas de análise de processos, aplicação de modelos, entre outros. As escalas espaço-temporais na linha de costa consideram aspectos como a recuperação de praias, o clima de ondas na costa e a cota de inundação.

As ferramentas do SMC-Brasil podem ser divididas em duas:

(1) o SMC Tools que inclui uma base de dados de batimetria, ondas, nível do mar, transporte de sedimentos, etc.; e duas ferramentas de processamento de dados integradas, uma para realizar a análise estatística das variáveis ambientais, e outra ferramenta que permite realizar a transferência de uma série de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa;

(2) o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) propriamente dito, que integra uma série de modelos numéricos e permite dar um suporte prático à correta aplicação da metodologia de trabalho proposta nos Documentos Temáticos.

A execução do Projeto SMC-Brasil trouxe aprendizados importantes para o Brasil, colaborando na sensibilização e dimensionamento de problemas relevantes para ações de gestão da orla marítima, que devem balizar a estratégia para construção de um modelo de atuação para avaliação da proteção da linha de costa.

A primeira dificuldade esteve relacionada à falta de uma base de dados que permitisse o compartilhamento de informações, com metadados adequados. A oportunidade de disponibilizar uma base de dados via a ferramenta SMC – Brasil representa um incremento para o Brasil, enquanto se atua em ações mais estruturantes tanto para a disponibilização de dados, como na validação de modelagens que possam cobrir as lacunas de informações.

A base de dados de ondas e de nível de marés (maré astronômica e meteorológica) para a costa brasileira, que pode ser acessada via SMC Tools, foi obtida por meio de técnica de reanálise. Tendo como referência o ano de 2008, a série gerada representa o comportamento de ondas e marés dos últimos sessenta anos, a cada hora, com malha de 1km próximo a costa.

A iniciativa do SMC – Brasil mobilizou academia e órgãos gestores, possibilitando levantar a demanda de formação continuada de profissionais que irão atuar na gestão costeira. O acesso à ferramenta SMC – Brasil despertou a necessidade de ações mais sinérgicas entre a pesquisa e gestão, que possibilite aos estados costeiros, de forma cooperada com as universidades locais, realizar análises e estudos da dinâmica costeira para orientações mais precisas e eficazes no que diz respeito aos processos de licenciamento, zoneamento e planejamento territorial.

É importante deixar claro que o conjunto de produtos do Projeto SMC – Brasil não supre a necessidade dos dados em escala local, na precisão adequada. Tratam-se, portanto, de insumos para apoiar o Brasil na construção de um modelo de gestão brasileira para análise da proteção da linha de costa, que promova a difusão da informação e a qualificação do processo de tomada de decisão.

Em resumo, para o uso adequado da ferramenta SMC – Brasil é necessário investir na formação e capacitação de gestores, técnicos e pesquisadores no que se refere às técnicas de proteção e manejo das costas brasileiras e em conhecimentos básicos sobre dinâmica costeira. É

fundamental também que o país avance na estratégia de coleta e disponibilização de informações básicas sobre oceanografia, fundamental para a melhor aplicação de modelos e simulações. Ainda, reforça-se a necessidade de que este documento seja aplicado estritamente de acordo com seus objetivos e limitações, descritas a seguir.

## 1.2. Limitações do Uso do Documento

O projeto SMC – Brasil, juntamente com seus programas e documentos traz informações que são de grande valia ao considerar o desenvolvimento costeiro no Brasil. No entanto, é importante compreender que existem limitações nos dados adquiridos e resultados alcançados uma vez que foram assumidas algumas simplificações metodológicas. Para que o usuário utilize corretamente a informação contida neste documento deve-se levar em consideração as seguintes limitações:

- Falta de uma base única de elevação de terreno que contenha dados de batimetria e topografia. Embora, a zona costeira tenha levantamento batimétrico, sob a responsabilidade da Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN, e cartográfico, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e pela 5ª Divisão de Levantamento do Exército – V-DL, estes instrumentos não possuem referências geodésicas comuns, nem horizontais, nem verticais, o que significa dizer que o nível zero de uma base não coincide com o nível zero da outra. Essa diferença é relevante na análise de variações do nível do mar.
- Apesar da base de dados do SMC – Brasil possuir uma longa série de dados de ondas (60 anos), esta foi simulada a partir de dados de vento e da batimetria global, e não propriamente medidos. Entretanto foi calibrada e validada para águas profundas;
- A base de dados, proveniente de reanálise global, não apresenta grande resolução local. Além disso, o modelo utilizado na geração dessa base de dados é relativamente simples, desconsiderando processos de difração, por exemplo, por promontórios e ilhas.

## 1.3. Estrutura do Documento

O documento temático de Níveis e Cota de Inundação descreve a base de dados de níveis do mar encontradas no SMC-Brasil. Esta base de dados é formada por séries temporais de duas variáveis, a maré astronômica e a maré meteorológica. A maré astronômica é produzida pela força de atração gravitacional do sistema Terra-Lua-Sol, enquanto que a maré meteorológica é produzida por variações atmosféricas (vento e pressão).

O conteúdo deste documento está dividido em três capítulos, onde no primeiro se encontra a introdução ao conteúdo que será apresentado no documento. As duas bases de dados de maré astronômica e maré meteorológica são descritas no segundo capítulo deste documento. A inclusão destas bases de dados no SMC-Brasil é vital para se realizar duas das principais atividades:

- A primeira implica em conhecer as características estatísticas da maré astronômica na costa brasileira, de forma que, quando se realiza o estudo de uma praia, o SMC-Brasil dispõe de informação necessária para propagar o clima de ondas aos níveis de maré correspondente.

- A segunda consiste em contar com a informação necessária para, em combinação com a base de dados do clima de ondas, determinar a cota de inundação em qualquer praia da costa brasileira.

O terceiro capítulo deste documento se dedica a descrever a metodologia implementada no SMC-Brasil para determinar a cota de inundação e nível do mar em uma praia da costa brasileira através das ferramentas implementadas no SMC-Brasil.

## 1.4. Escopo do Documento

Os objetivos principais deste documento são:

- Descrever as bases de dados da Maré Astronômica e Maré Meteorológica (níveis) incorporadas no Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil)
  1. Explicar a base teórica necessária para entender e aplicar adequadamente as bases de dados descritas neste documento.
  2. Descrever a metodologia empregada para se gerar a base de dados.
  3. Descrever a validação das mesmas.
  4. Descrever as características das bases de dados na zona costeira do Brasil.
- Descrever a metodologia aplicada pelo SMC-Brasil para determinar o Nível do Mar (NM) bem como a Cota de Inundação (CI) em um ponto determinado da costa brasileira.
  1. Explicar os conceitos de NM e CI
  2. Descrever a metodologia empregada pelo SMC-Brasil para realizar os cálculos de NM e CI

# CAPÍTULO 2: BASES DE DADOS DE NÍVEIS INCLUÍDAS NO SMC-BRASIL

## 2. Bases de Dados de Níveis incluídas no SMC–Brasil

### 2.1. Introdução

As bases de dados de níveis disponíveis no SMC-Brasil são compostas por séries de maré astronômica e maré meteorológica distribuídas ao longo da costa brasileira. Cada uma das séries tem uma duração de 60 anos com um intervalo de tempo de 1 hora. A base de dados da maré astronômica (MA) conta com 125 séries temporais, enquanto a maré meteorológica (MM) tem 24 séries.

O efeito da MA e MM na costa é observado como uma variação do nível do mar ou superfície livre. É neste nível em que as ondas se propagam. No entanto, ambos têm uma origem ou mecanismo de geração bem diferentes. Enquanto que a MA é o resultado da interação das forças gravitacionais da Terra, Lua e o Sol, sendo completamente previsível, a MM é um resultado de forçantes atmosféricas como a pressão do vento ou variações de pressão.

Devido às características específicas da MA e MM, diferentes metodologias têm sido utilizadas para a obtenção das séries incluídas no SMC-Brasil. As séries de MA são reconstruídas a partir de constantes harmônicas obtidas do modelo global de marés TPXO da Universidade de Oregon (EGBERT *et al.*, 1994; EGBERT; EROFEEVA, 2002). A partir dessas constantes harmônicas se pode construir a série de elevação do nível do mar causada pela MA em qualquer ponto do oceano e para qualquer período. Além disso, a base de dados de MM requer a realização de uma simulação numérica forçada com campos de pressão atmosférica e ventos.

Esta seção do documento explora as características de cada uma das bases de dados e explica em detalhes seu processo de geração. Finalmente, os processos de validação realizados são descritos para a verificação da qualidade da base de dados, onde é feita uma descrição das características da MA e MM na costa do Brasil.

### 2.2. Base de dados da maré astronômica

#### 2.2.1. Introdução

Este capítulo fornece uma descrição da base de dados de MA incluída no SMC-Brasil. Esta base de dados será chamada de GOT (*Global Ocean Tides*). O conteúdo deste capítulo se divide em três partes: a primeira faz uma descrição de conceitos teóricos necessários para se entender do que se trata, como ocorre, como se comporta e como se pode prever a MA. A segunda parte explica como foi gerada a base de dados incluída no SMC-Brasil e na terceira se descrevem as características gerais da MA no Brasil, com ênfase no comportamento espacial.

#### 2.2.2. A maré astronômica

##### 2.2.2.1. O que é a maré astronômica?

A maré astronômica é definida como o conjunto de movimentos regulares de elevação e queda do nível do mar com períodos próximos de 12 ou 24 horas, produzidos pelos efeitos gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol. Outros corpos celestes do sistema solar também exercem atração, sendo, no entanto pequenas quando comparadas e consideradas com a da Lua e do Sol.

Esta elevação e queda do nível do mar em um determinado ponto pode se representar por uma onda, onde as cristas correspondem aos momentos em que a maré atinge seu maior valor ou altura (preamar) e as cavas, quando a mínima é atingida (baixamar). A Figura 2 mostra um exemplo de onda de maré típica com duas preamares e duas baixamars. O tempo que transcorre entre duas cristas é chamado de período ( $T$ ) e o tempo que transcorre de um ponto de referência até a primeira preamar ou crista é chamada de fase ( $\alpha$ ). Como será observado mais adiante, o período, a amplitude e a fase das componentes da maré são suficientes para caracterizar a onda da maré.

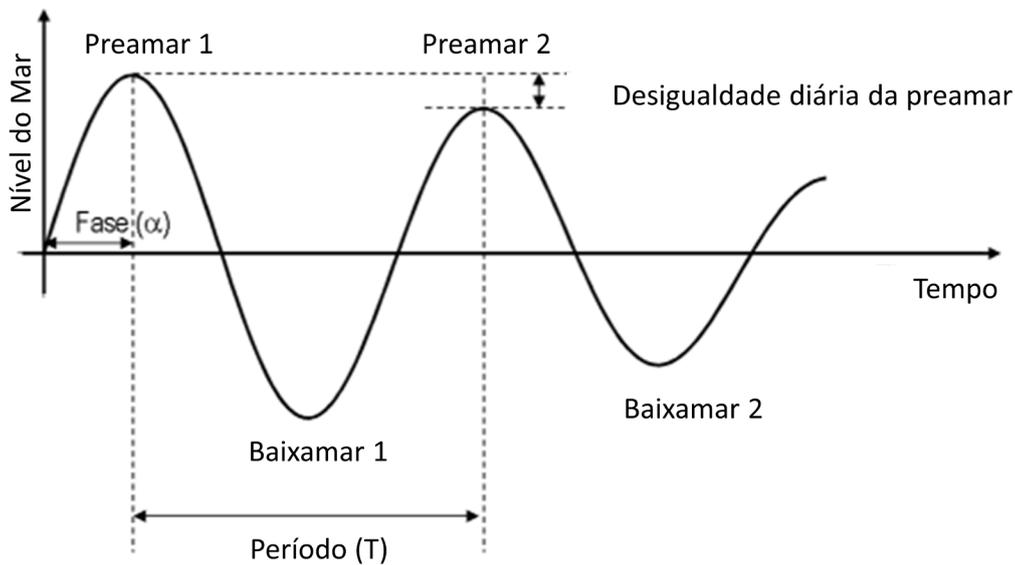


Figura 2: Descrição de uma onda típica de maré.

### 2.2.2.2. Como se gera a maré astronômica?

As primeiras explicações científicas do fenômeno da maré astronômica se devem a Newton (1686) e ao que hoje se conhece como *Teoria do Equilíbrio*. Esta teoria descreve adequadamente as forças que intervêm na geração das marés. No entanto, não é apropriada para a previsão do nível da maré em um ponto dado, num momento determinado.

#### 2.2.2.2.1. Teoria do equilíbrio

Esta teoria desenvolvida por Newton determina a forma que a superfície do oceano adquiriria em uma terra completamente coberta por água, na qual não há inércia ou correntes. A força motriz nessa teoria é o campo gravitacional da Lua e do Sol. Ou seja, a força gravitacional do que é conhecido como o sistema Terra-Lua-Sol. A fim de analisar as forças motrizes da maré de forma simplificada e sistemática, se considera primeiro o sistema Terra-Lua e, posteriormente, se analisa o sistema Terra-Sol e finalmente o sistema completo.

## Sistema Terra-Lua

O sistema Terra-Lua considera somente a interação entre a Terra e a Lua (Figura 3), sendo que a força motriz para cada ponto da superfície terrestre é a resultante da força gravitacional lunar e a força centrífuga da rotação do sistema.

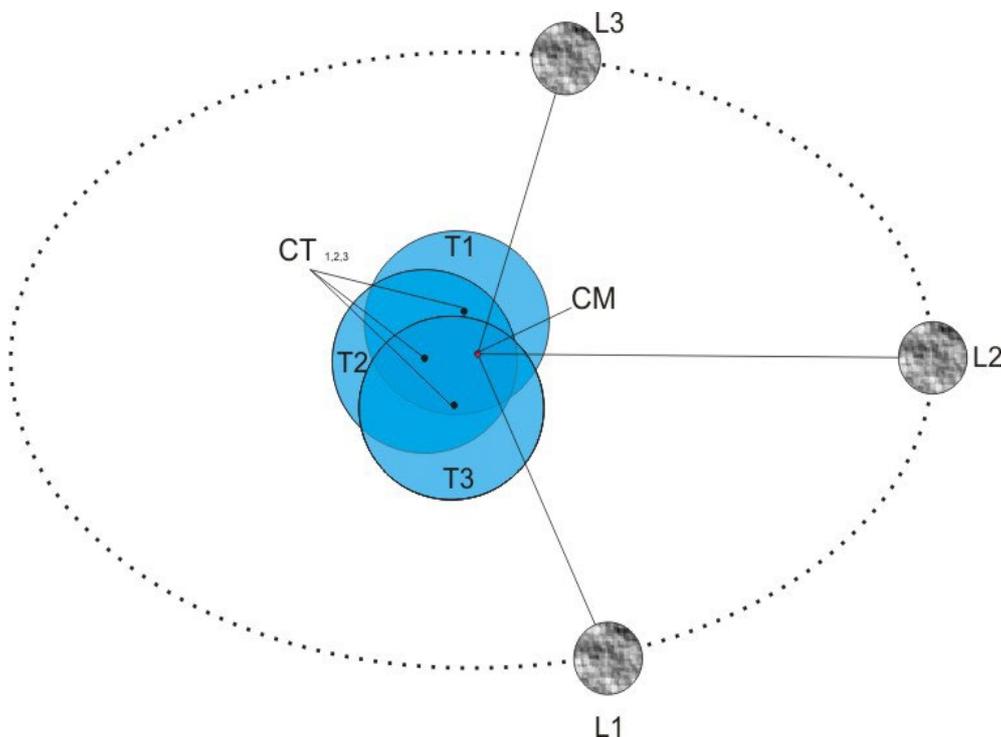


Figura 3: Sistema Terra-Lua. T = Terra; L = Lua; CT = Centro da Terra; CM = Centro de Massa.

Esta teoria considera as seguintes hipóteses:

1. A rotação da Terra sobre seu próprio eixo é desprezível, considerando-se apenas a rotação do sistema Terra-Lua em torno de um eixo que passa pelo centro de massa de tal sistema. Este centro de massa se encontra na Terra, uma vez que a massa da Terra é muito maior do que a da Lua;
2. A Lua é considerada como o único corpo causador da maré, e gira em torno da Terra no plano Equatorial;
3. Presume-se que a superfície da Terra é perfeitamente esférica e que é completamente coberta por uma camada de água de espessura uniforme;
4. A inércia das massas de água é desprezível uma vez que estas respondem imediatamente às forças que geram a maré.

A resultante líquida entre a força centrípeta e a de atração atuantes em qualquer ponto da Terra é conhecida como a força geradora de maré. A magnitude, direção e sentido da força centrípeta é a mesma em qualquer ponto da Terra, no entanto, a força de atração varia de magnitude e direção de acordo com sua localização. Sua componente horizontal é conhecida como força de tração, sendo

a causadora das marés. Os componentes verticais dessa força resultante são insignificantes em relação à força gravitacional da Terra.

A distribuição desta força sobre a superfície terrestre (Figura 4) varia de modo que seu efeito se traduz em um movimento de massas de água até o ponto da Terra mais próximo da Lua e até o ponto mais distante. Por esta razão se observa nestes pontos um aumento no nível do mar, atingindo elevações máximas, enquanto que nos pontos de meridiano perpendicular se observam elevações mínimas.

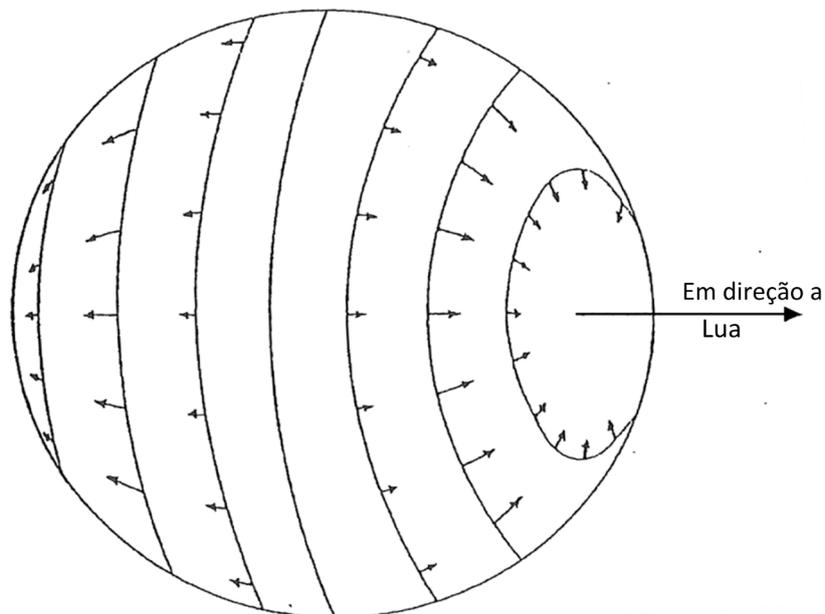
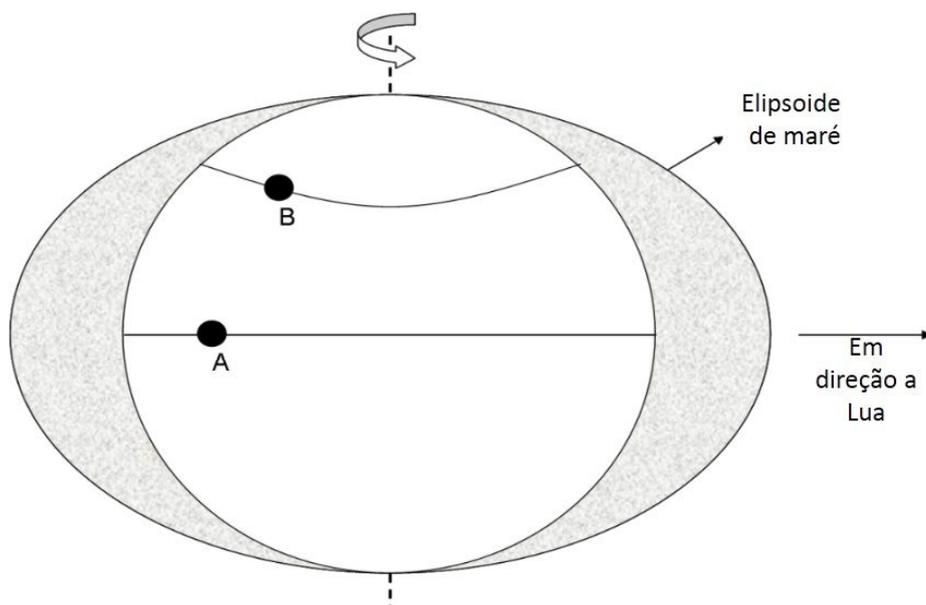


Figura 4: Distribuição das forças motrizes da maré astronômica.

Esta superfície corresponde a um elipsoide que sempre aponta para a Lua (Figura 5), uma vez que este elipsoide gira seguindo a Lua. Esse movimento ocorre para qualquer ponto na superfície da Terra duas vezes por dia com momentos de elevações máximas (preamar) e dois com elevações mínimas (baixamar). Estas variações são conhecidas como marés semi-diurnas e têm uma periodicidade de 12,42 horas. As marés semi-diurnas são maiores no Equador e diminuem com o aumento da latitude.



**Figura 5:** Superfície de equilíbrio da elevação do mar (exagerada) devido ao equilíbrio das forças de tração do sistema Terra-Lua.

Até o momento sabe-se que a Lua se encontra sempre sobre o Equador. No entanto, conforme se desloca em torno da Terra seu declínio varia entre  $18,5^\circ$  e  $28,5^\circ$ . Se este efeito é considerado, os ciclos de marés em latitudes elevadas se tornam diurnos.

Finalmente, também é importante considerar que a órbita da Lua é elíptica, por isso existe um ponto de proximidade com a Terra chamado perigeu e outro de distância máxima ou apogeu. O período entre um perigeu e o seguinte é de 27,55 dias. As marés se refletem com uma intensificação durante o perigeu e uma atenuação no apogeu.

### **Sistema Terra-Sol**

O sistema Terra-Sol funciona da mesma forma que o sistema Terra-Lua, uma vez que também produz marés semi-diurnas e diurnas. No entanto, mesmo que o Sol tenha uma massa muito maior do que a da Lua e também se encontra mais distante da Terra, é fácil demonstrar que o efeito do Sol é 0,46 vezes menor do que o da Lua sobre as marés.

### **Sistema Terra-Sol-Lua**

Até agora se mostrou como a Lua e o Sol produzem as marés lunares e solares, respectivamente. No entanto, o efeito da Lua e do Sol em algumas ocasiões se soma e em outras se opõe.

Quando a Lua e o Sol se encontram em fase, ou seja, durante a Lua cheia e a Lua nova, ocorrem as maiores preamares e baixamars. Por outro lado, quando estão em quadratura, quarto crescente e quarto minguante, ocorrem as menores (Figura 6). As primeiras são chamadas marés de sizígia e as segundas marés de quadratura.

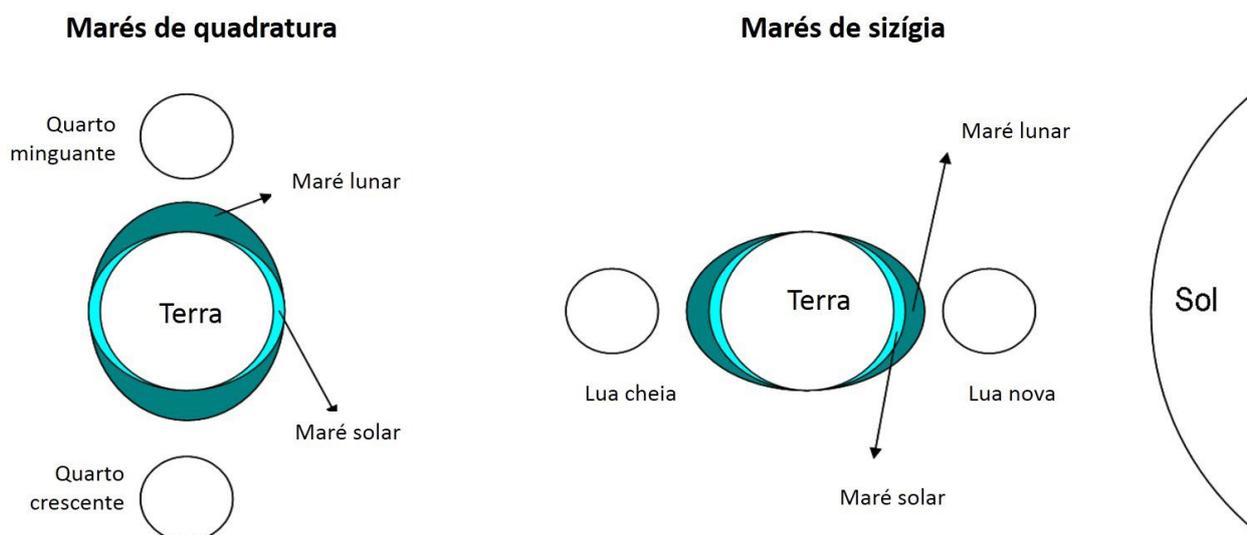


Figura 6: Posição dos astros no caso de marés de quadratura e de sizígia.

Visto que as marés de sizígia ocorrem cada vez que a Lua e o Sol estão alinhados (Lua nova e cheia) enquanto que nas marés de quadratura esse alinhamento não ocorre (Lua crescente e minguante), se determina a periodicidade destas através das velocidades angulares da Lua  $\Omega_L$ , e do Sol  $\Omega_S$ . Considerando que a rotação da Lua ao redor da Terra se produz em  $2T$ , vê-se que:

$$2T = \frac{2\pi}{\Omega_L - \Omega_S} = \frac{360^\circ}{0,508^\circ/h} = 708h \quad (1)$$

Uma vez que  $T=354$  horas, isto equivale a aproximadamente 14,8 dias.

Quando a declinação lunar ou solar é zero, ocorrem intensificações das marés semi-diurnas. Por exemplo, as marés semi-diurnas lunares se reduzem em 23% quando a Lua alcança sua máxima declinação, enquanto que as marés semi-diurnas solares se reduzem em 16% com a máxima declinação solar. Por outro lado, durante os equinócios (março e setembro) as marés de sizígia são especialmente importantes e são conhecidas como marés equinociais de sizígia.

As forças de maré extremas ocorrem quando a Lua e o Sol se encontram alinhados com a Terra e em suas posições respectivas mais próximas. Além disso, no caso de marés semi-diurnas, as estrelas devem estar no Equador. Esta situação de coincidência do periélio com a declinação solar nula (equinócio) ocorre muito raramente, ou seja, a próxima vez vai ocorrer no ano de 6581. No entanto, de vez em quando o equinócio coincide com o perigeu lunar e a declinação lunar é igual a zero. Tem-se observado que os limites máximos de marés equinociais de sizígia correspondem a um período de 4,5 anos e ocorrem quando o perigeu lunar coincide com um dos equinócios, durante seu ciclo de 8,85 anos. O perigeu lunar e a declinação lunar zero, coincidem, em contrapartida, a cada 6 anos.

Além disso, vale destacar que de acordo com esta teoria, seria de se esperar que num local qualquer as marés altas coincidisse com a posição da Lua sobre o meridiano local. Todavia ocorrem um pouco antes ou depois. Esta diferença deve-se à inércia das massas de água, que a teoria do equilíbrio supõe como desprezíveis.

### 2.2.2.3. Como a maré astronômica se comporta nos oceanos?

A teoria do equilíbrio explica adequadamente as forças que causam a maré, no entanto, na tentativa de descrever as marés, ocorrem discrepâncias significativas, tanto na amplitude, quanto na fase. Os principais motivos que induzem a esses erros são:

1. A Terra não se encontra coberta totalmente por uma camada de água de espessura uniforme;
2. A forma irregular e a profundidade variável das bacias oceânicas não é levada em consideração;
3. A hipótese de que a inércia das massas d'água é desprezível não é correta;
4. A rotação da Terra introduz a força de Coriolis que altera significativamente os movimentos associados com a maré.

No século XVII, desenvolveu-se a Teoria Dinâmica, na qual se aplicavam as equações fundamentais da hidrodinâmica, que leva em conta a configuração das bacias oceânicas, a profundidade, a força de Coriolis, os efeitos da inércia e de atrito, sempre conservando as mesmas forças geradoras.

A solução dessas equações é complexa, porém, se torna um salto na descrição do fenômeno, uma vez que abandona o conceito do elipsoide de equilíbrio e se introduz no conceito das ondas de maré. Ao resolver estas equações se obtêm soluções do tipo ondas longas que são afetadas pelas costas e o fundo, produzindo amplificações em determinadas áreas. A inclusão da força de Coriolis faz com que as ondas viajem ao longo da costa em sentido anti-horário no Hemisfério Norte e horário no Sul e como a amplitude da onda de maré diminui com a distância da costa, existem pontos ou nós com amplitude nula, chamados pontos anfidrômicos.

Para um ponto anfidrômico dado, podem-se definir os pontos nos quais a onda de maré tem a mesma fase e a mesma amplitude. Estas linhas são aproximadamente perpendiculares entre si. Este conjunto de pontos anfidrômicos e as linhas de fase e amplitude são chamados de sistema anfidrômico. A Figura 7 mostra os sistemas anfidrômicos da componente harmônica  $M_2$  no globo terrestre.

### 2.2.2.4. Como se pode determinar a maré astronômica?

A descrição e previsão da maré em um determinado local pode ser feita por meio da análise harmônica de marés. Esta análise baseia-se no conhecimento de que a maré é composta por uma série de componentes harmônicas com períodos perfeitamente estabelecidos, uma vez que coincidem com períodos de movimentos astronômicos relativos entre a Terra, Lua e Sol

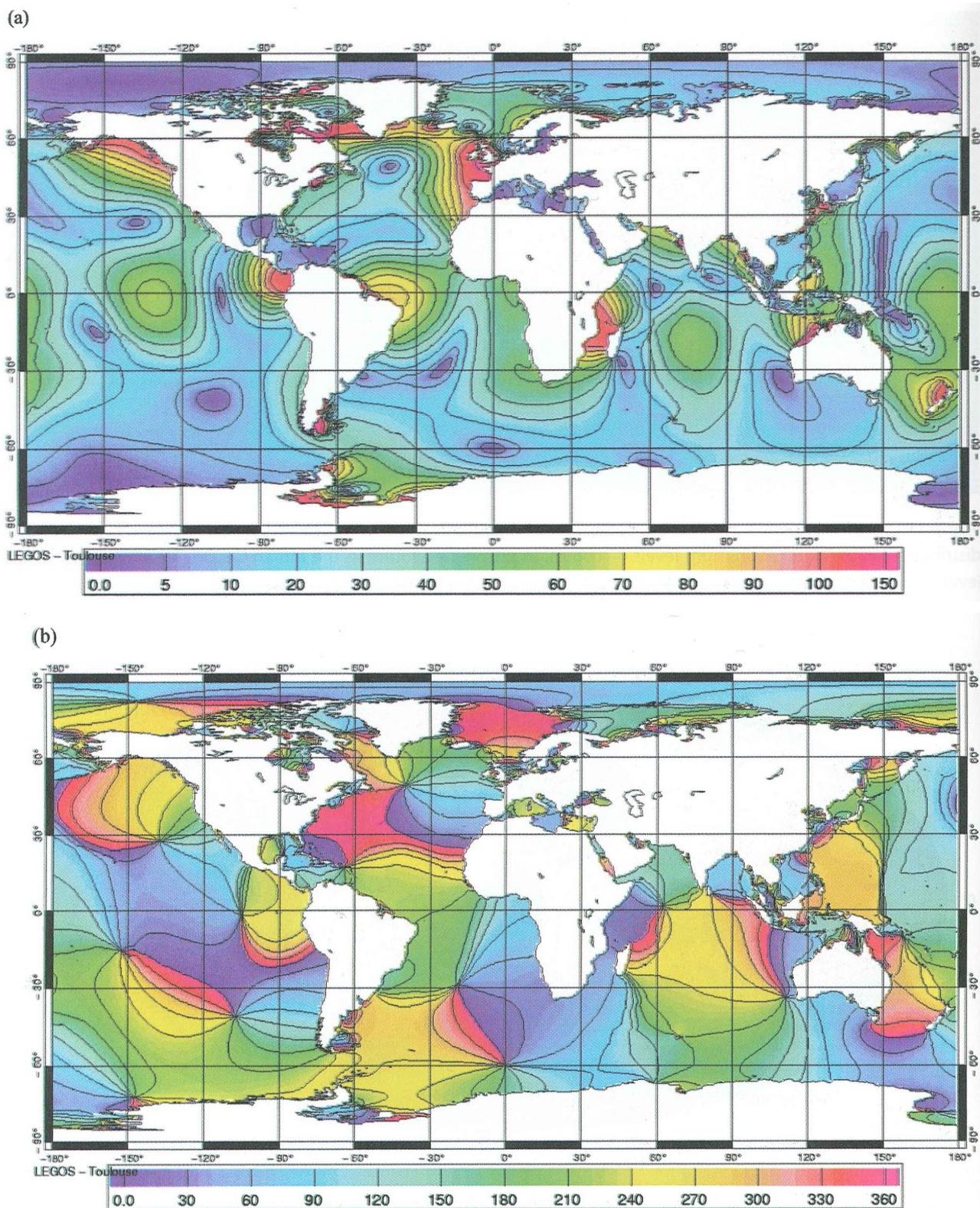


Figura 7: Mapa de (a) amplitude (cm) e (b) fase ( $^{\circ}$ ) da componente  $M_2$  da maré astronômica. Fonte: Pugh (2004).

### Componentes harmônicas

As componentes harmônicas são obtidas quando se assume que as forças geradoras produzidas pela Lua e o Sol, em suas trajetórias variáveis, são produzidas por um número finito de

planetas fictícios. Estes planetas giram ao redor da Terra em órbitas circulares no plano equatorial a uma velocidade angular constante, de tal forma que cada um, ou a combinação de vários reproduzem a frequência de uma determinada perturbação astronômica. Cada um destes satélites fictícios é identificado por uma letra e um sub-índice que indica o número de oscilações do elemento durante um dia solar.

Por exemplo, a componente lunar  $M_2$  representa o efeito da rotação da Lua em relação à Terra. Portanto, sua frequência de rotação é

$$\Omega_{T-L} = \Omega_T - \Omega_L = 14,4921^\circ/h \quad (2)$$

E seu período:

$$T_{T-L} = \frac{360^\circ}{14,4921^\circ/h} = 24,8412h \quad (3)$$

que é a duração de um dia lunar. Visto que em um período se observam duas preamares e baixamares, a componente harmônica  $M_2$  tem um período de  $T_M = T_{T-L}/2 = 12,4206h$ .

Da mesma forma a componente  $S_2$ , que corresponde à rotação da Terra em relação ao Sol, tem um período  $T_S = 12,00h$

Para outros fins, é necessário definir as componentes adicionais, tais como a trajetória elíptica da Lua ( $N_2$ ), os efeitos da declinação da Lua e do Sol ( $K_2, K_1, O_1, P_1$ ), ou movimentos de longo período da Lua e Sol ( $M_f, M_m, S_{sa}$ ). No Quadro 1 as principais componentes harmônicas são indicadas, assim como os símbolos, período em horas solares e amplitude relativa. A amplitude relativa se introduz de forma arbitrária, atribuindo um coeficiente de 100 para a componente maior.

**Quadro 1:** Principais componentes harmônicas da maré astronômica.

NOME	SÍMBOLO	PERÍODO	COEFICIENTE
Lunar Principal Semidiurna	$M_2$	12,42	100,0
Solar Principal Semidiurna	$S_2$	12,00	46,6
Lunar Elíptica Maior Semidiurna	$N_2$	12,66	19,2
Luni-Solar Semidiurna	$K_2$	11,97	12,7
Solar Elíptica Maior Semidiurna	$T_2$	12,01	2,7
Lunar Elíptica Menor Semidiurna	$L_2$	12,19	2,8
Lunar Elíptica 2º ordem	$2N_2$	12,91	2,5
Luni-Solar Diurna	$K_1$	23,93	58,4
Lunar Principal Diurna	$O_1$	25,82	41,5
Solar Principal Diurna	$P_1$	24,07	19,4
Lunar Elíptica Maior Diurna	$Q_1$	26,87	7,9
Lunar Elíptica Menor Diurna	$M_1$	24,84	3,3
Lunar Quinzenal	$M_f$	327,90	17,2
Lunar Mensal	$M_m$	661,30	9,1
Solar Semestral	$S_{sa}$	4383	8,0

A partir das componentes descritas até agora, a onda de maré pode ser representada no oceano. No entanto, quando a onda de maré se encontra na área perto da costa, em estuários ou

baías, é necessário introduzir um número de componentes adicionais, cuja origem se deve a efeitos não-lineares produzidos pela baixa profundidade, atrito e os efeitos dos contornos.

O atrito gera componentes de velocidade angular equivalente a três vezes a componente de base, de modo que se, por exemplo, para a componente astronômica  $M_2$  se produz a componente  $M_6$  que apresenta 6 oscilações diárias e não é de origem astronômica.

A profundidade afeta a propagação de ondas em áreas muito rasas, em áreas onde a profundidade é proporcional à amplitude da onda, por exemplo, os estuários.

Sob estas condições, uma deformação do perfil de onda (Figura 8) ocorre. Para reproduzir essas modificações da onda é necessário incluir componentes adicionais com frequências duplas ou triplas (ex:  $M_4$  e  $M_6$  para o caso de  $M_2$ ).

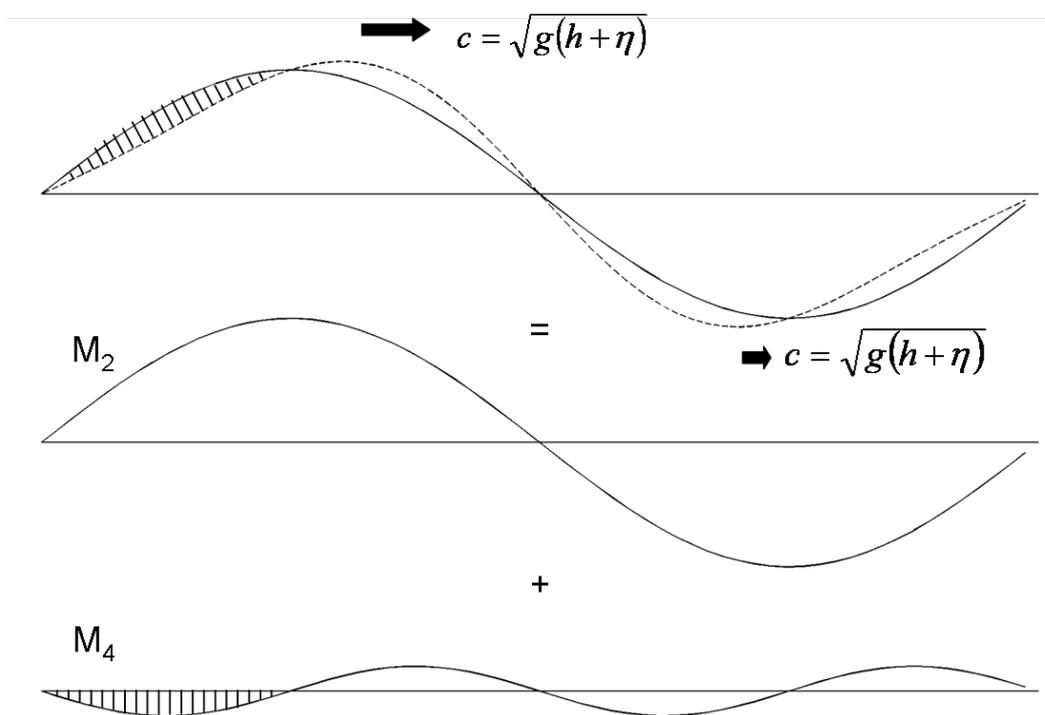


Figura 8: Deformação do perfil da onda de maré e formação de sobre-marés.

Finalmente, quando a onda de maré se propaga em áreas onde ela é afetada pelos contornos, os efeitos não lineares levam à interação entre componentes, produzindo outras diferentes das originais.

Estes efeitos combinados produzem o aparecimento de uma série de componentes:

- Sobre-marés ou componentes super-harmônicas: Sua velocidade angular é um múltiplo exato de seus componentes astronômicos de origem. As sobre-marés lunares são  $M_4$ ,  $M_6$ ,  $M_8$ , ..., enquanto que as solares são  $S_4$ ,  $S_6$ ,  $S_8$ , ... O subíndice indica o número de oscilações por dia

- Marés compostas: Sua velocidade angular é a soma ou a diferença das velocidades de duas ou mais componentes astronômicas. Por exemplo, com a soma de  $M_2$  e  $S_2$  se obtém  $MS_4$  e  $2MS_6$  por somar duas vezes as velocidades de  $M_2$  e  $S_2$ .

Os coeficientes de sobre-marés e marés compostas dependem das características locais de dimensões e contornos da zona costeira, baía ou estuário.

As sobre-marés compostas mais significativas estão descritas no Quadro 2.

**Quadro 2:** Lista das principais sobre-marés e marés compostas.

SÍMBOLO	ORIGEM	FREQUÊNCIA
$MNS_2$	$M_2+N_2+S_2$	$2\omega_\epsilon-5\omega_\mu+2\omega_\sigma+\omega_\pi$
$2MS_2$	$2M_2+S_2$	$2\omega_\epsilon-4\omega_\mu+2\omega_\sigma$
$2SM_2$	$2S_2-M_2$	$2\omega_\epsilon+2\omega_\mu-4\omega_\sigma$
$MK_3$	$M_2+K_1$	$3\omega_\epsilon-2\omega_\mu$
$2MK_3$	$2M_2-K_1$	$3\omega_\epsilon-3\omega_\mu$
$SK_3$	$S_2+K_1$	$3\omega_\sigma-2\omega_\sigma$
$SO_3$	$S_2+O_1$	$3\omega_\epsilon-2\omega_\mu-2\omega_\sigma$
$M_4$	$2M_2$	$4\omega_\pi-4\omega_\mu$
$MS_4$	$M_2+S_2$	$4\omega_\epsilon-2\omega_\mu-2\omega_\sigma$
$MN_4$	$M_2+N_2$	$4\omega_\epsilon-5\omega_\mu+\omega_\pi$
$MK_4$	$M_2+K_2$	$4\omega_\epsilon-2\omega_\mu$
$S_4$	$2S_2$	$4\omega_\epsilon-4\omega_\sigma$
$M_6$	$3M_2$	$6\omega_\epsilon-6\omega_\mu$
$2MS_6$	$2M_2+S_2$	$6\omega_\epsilon-4\omega_\mu-2\omega_\sigma$
$2MN_6$	$2M_2+N_2$	$6\omega_\epsilon-7\omega_\mu+\omega_\pi$
$2SM_6$	$2S_2+M_2$	$6\omega_\epsilon-2\omega_\mu-4\omega_\sigma$
$MSN_6$	$M_2+S_2+N_2$	$6\omega_\epsilon-5\omega_\mu-2\omega_\sigma+\omega_\pi$
$S_6$	$3S_2$	$6\omega_\epsilon-6\omega_\sigma$
$M_8$	$4M_2$	$8\omega_\epsilon-8\omega_\mu$
$3MS_8$	$3M_2+S_2$	$8\omega_\epsilon-6\omega_\mu-2\omega_\sigma$
$2(MS)_8$	$2M_2+2S_2$	$8\omega_\epsilon-4\omega_\mu-4\omega_\sigma$
$2MSN_8$	$2M_2+S_2+N_2$	$8\omega_\epsilon-7\omega_\mu-2\omega_\sigma+\omega_\pi$
$S_8$	$4S_2$	$8\omega_\epsilon-8\omega_\sigma$

### Análise harmônica

O método de análise harmônica consiste em, a partir de medições do nível do mar (obtidas pelos marégrafos e altímetros montados em satélites) durante um período, que se obtenham as amplitudes e fases das ondas, componentes das frequências características da maré.

A série de nível do mar medida  $\eta(t)$  em um determinado ponto durante o período t, pode ser expressa como a soma de uma série de funções de harmônicas, tal como:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1} A_n \cos(\omega_n t) + \sum_{n=1} B_n \text{sen}(\omega_n t) = a_0 + \sum_{n=1} a_n \cos(\omega_n t - \alpha_n) \quad (4)$$

Onde  $a_0$  é a amplitude do nível médio,  $A_n$  e  $B_n$  são as amplitudes das componentes senoidais e cossenoidais da componente considerada com frequência  $\omega_n$ , e finalmente  $a_n$  e  $\alpha_n$  são, respectivamente, a amplitude e a fase de k componentes considerados, que se definem como:

$$a_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (5)$$

$$\alpha_n = \tan^{-1} -B_n/A_n \quad (6)$$

O número de componentes a serem consideradas depende da precisão com que se quer determinar a maré.

Dessa forma se há uma série de maré instrumental de duração T horas, é possível resolver o sistema de equações lineares tais que proporcionem a melhor combinação de coeficientes  $a_n$  e  $\alpha_n$  para as frequências. O sistema pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados. Com estes coeficientes e avaliando a Equação 4 para o período temporal desejado, se obtém a série temporal. O procedimento é bastante simples, porém, atualmente existem programas que executam essas operações diretamente, como o *t\_tide* (PAWLOWICZ *et al.*, 2002).

### 2.2.2.5. Para que é utilizada a maré astronômica no SMC – Brasil?

As mudanças produzidas pela subida e descida do nível do mar têm implicações importantes na dinâmica e morfologia de uma praia, por isso essas variações são consideradas no SMC-Brasil para simular diferentes processos. De forma particular se considera a propagação da onda no cálculo da cota de inundação.

Em termos de propagação das ondas, as mudanças de nível produzem sucessivos aumentos e diminuições da profundidade ou altura da coluna de água em que a ondulação se propaga. Estas variações de profundidade, especialmente perto da costa, são fundamentais para determinar em que lugar a onda sofreu empinamento (*shoaling*), refração ou quebra. A Figura 9 mostra um exemplo de como o nível da maré afeta a posição da arrebentação e quebra da onda em uma praia. O SMC-Brasil está preparado para considerar estas variações de nível na transferência da onda de um ponto DOW até a costa (para maiores informações consultar IH CANTABRIA – MMA (2017) “Documento Temático de Ondas”).

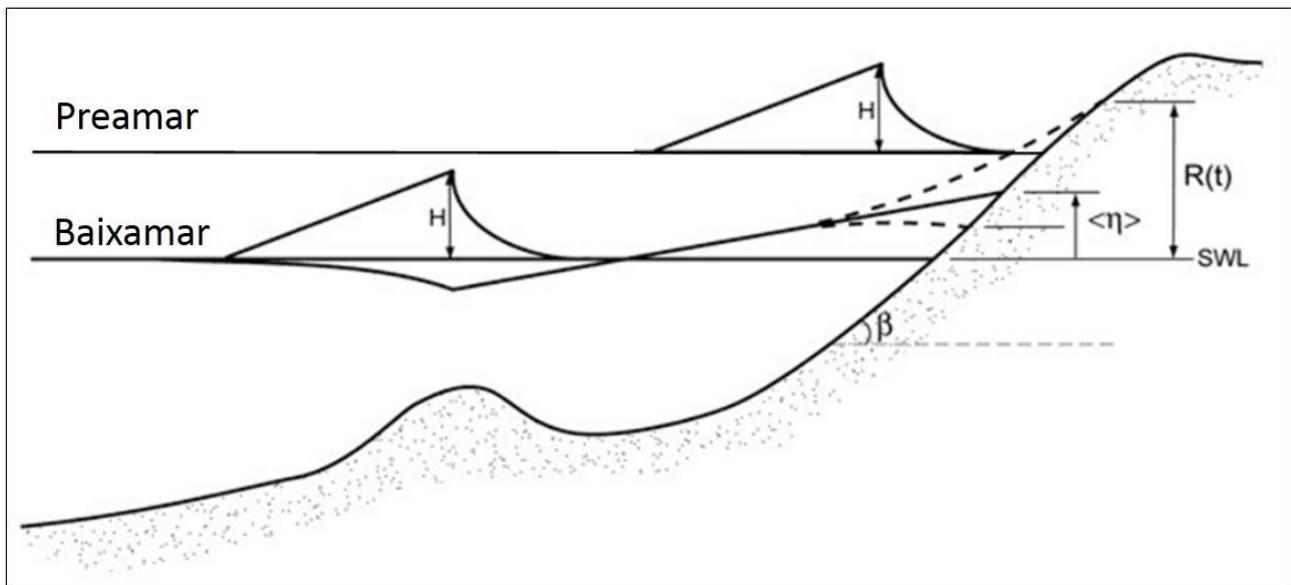


Figura 9: Esquema da variação do ponto de ruptura de um estado do mar com altura  $H$ , em função do nível de maré astronômica sobre o qual ocorre a propagação.

Por outro lado, as variações de nível devido à MA são fundamentais para determinar o nível máximo ou cota de inundação em uma praia. Esta cota é também afetada pela elevação da maré meteorológica e pelo *runup* produzido por ondas quebrando na praia. A terceira parte deste documento se dedica a explicar como esses cálculos são feitos.

### 2.2.3. Metodologia empregada para se gerar a base de dados da maré astronômica no SMC – Brasil

A metodologia utilizada para gerar a base de dados de maré astronômica do SMC-Brasil consistiu em:

1. Seleção de pontos: Um número de pontos foi selecionado ao longo da costa do Brasil, com uma resolução de 50 km (Figura 10).



Figura 10: Pontos selecionados para se gerar a base de dados da maré astronômica do SMC-Brasil.

2. Preparação das constantes harmônicas: As constantes harmônicas foram obtidas a partir do modelo global de marés TPXO, desenvolvido pela Universidade de Oregon (EGBERT *et al.* 1994; EROFEEVA; EGBERT, 2002). O TPXO é um modelo inverso de marés que resolve as equações de águas rasas e assimila informações do nível do mar derivadas das observações do sensor TOPEX/Poseidon e marégrafos (ARDALAN; HASHEMI-FARAHANI, 2007). O modelo representa um melhor ajuste (em termos de mínimos quadrados) da equação de maré de Laplace aos dados de satélite resultantes da missão TOPEX/Poseidon e os marégrafos. Atualmente, o modelo TPXO é um dos modelos globais de maré mais precisos.

A base de dados inclui oito constantes harmônicas ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ , e  $Q_1$ ) e duas de longo período ( $M_f$  e  $M_m$ ), que são fornecidas em uma grade global de 1440 x 721 pontos, com resolução espacial de 0,25°. A Figura 11 mostra um exemplo da amplitude e a fase da componente  $M_2$  no oceano global.

3. Previsão das séries de marés astronômicas: Em cada um dos pontos selecionados foram previstas as séries de maré astronômica no período 1948-2009, por meio de ferramentas de processamento (Romstools) desenvolvidas pelo *Institut de Recherche pour le Developpement* disponível no site <http://www.romsagrif.org/> e o modelo de análise harmônica t\_tide (PAULOWICZ

et al., 2002). Esta metodologia foi aplicada pelo IH Cantabria no projeto “Efeitos das mudanças climáticas sobre a costa da América Latina e do Caribe (C3A)”.

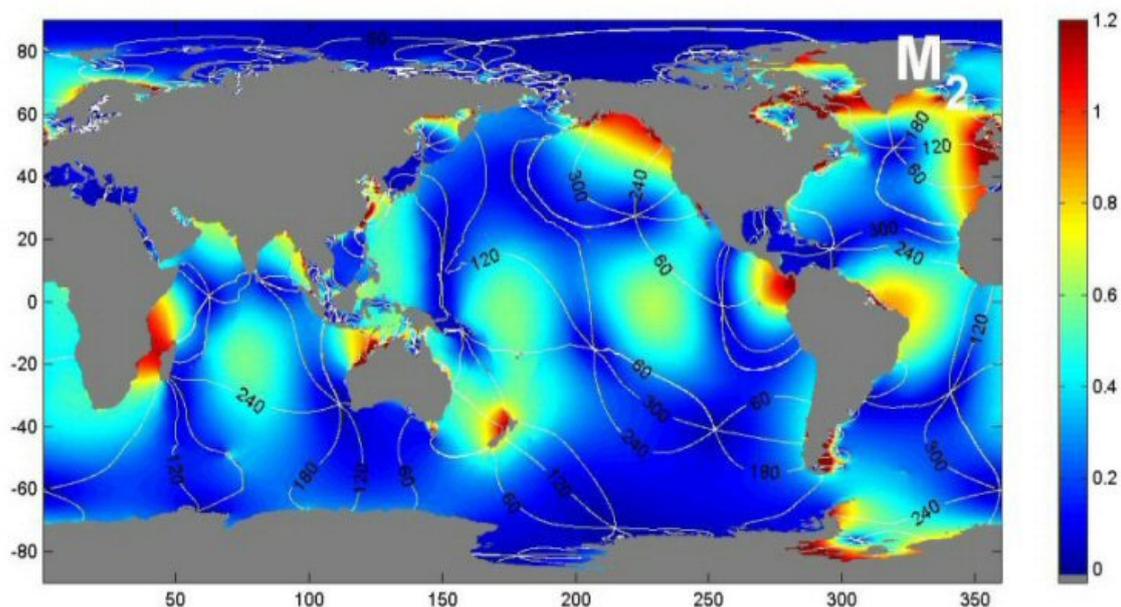


Figura 11: Mapa da componente de maré  $M_2$  calculada com o modelo TPXO. Fonte: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

#### 2.2.4. Descrição da base de dados da maré astronômica no SMC-Brasil

A base de dados de maré astronômica SMC-Brasil é composta pelas séries reconstruídas em cada um dos pontos mostrados na Figura 10. Estas séries têm uma duração de 60 anos, tendo início em 1948 e término em 2008, com um intervalo de tempo de 1 hora. Essa base de dados é chamada de *Global Ocean Tides* (GOT).

#### 2.2.5. Validação da base de dados GOT

A fim de verificar a confiabilidade da base de dados GOT, foram feitas comparações com uma série de marégrafos na costa brasileira. Estas séries de marégrafos foram obtidas de diferentes fontes, tais como o Centro de Nível do Mar da Universidade do Havaí e a Marinha do Brasil.

São descritos neste capítulo as características dos registros de marégrafos utilizados, a metodologia de validação e os resultados obtidos.

##### 2.2.5.1. Dados disponíveis para validação

Para realizar a validação da base de dados GOT, foram disponibilizados os dados maregráficos a partir de duas diferentes fontes: O Centro do Nível do Mar da Universidade do Havaí (UHSLC) (<http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhsic/rqds.html>) e a Marinha do Brasil/DHN.

As bases de dados dos marégrafos encontrados na página *web* da UHSLC têm uma resolução temporal horária e os registros variam entre 1940 e 2007. Na Figura 12 se mostra a distribuição dos marégrafos disponíveis na América Central e do Sul, dos quais apenas dois são encontrados na costa

do Brasil. Devido à escassez de marégrafos na costa brasileira, optou-se por utilizar também os dois marégrafos mais próximos do Brasil, ao norte na zona do Caribe e ao sul na Patagônia. Dessa forma se tem quatro marégrafos para validar, distribuídos um ao norte do Brasil, dois na área central e um no sul do Brasil. Os marégrafos selecionados são indicados na Figura 12 com um ponto vermelho.

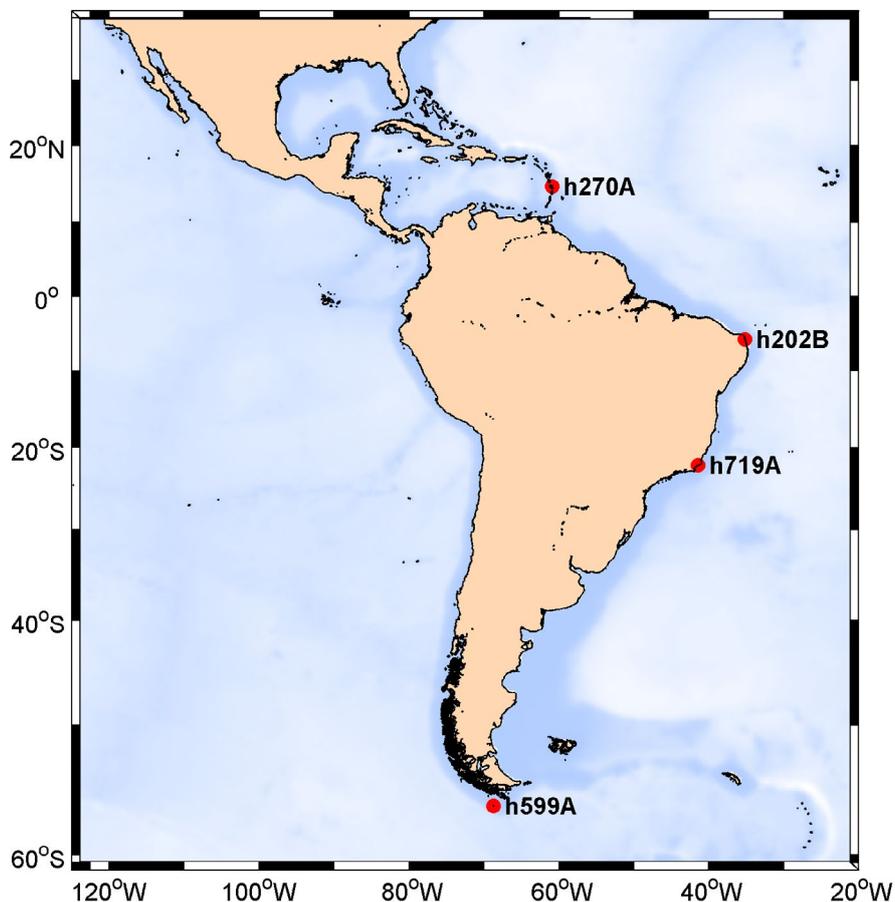


Figura 12: Marégrafos encontrados na base de dados da página web da UHSLC localizados na costa do Brasil.

Quanto às séries de marégrafos fornecidas pela Marinha do Brasil/DHN foram utilizadas 33 séries localizadas ao longo do litoral brasileiro (Figura 13). Estas séries têm uma resolução temporal horária e os registros variam entre 1955 e 2011. No entanto, a duração de cada registro é de cerca de um ano.

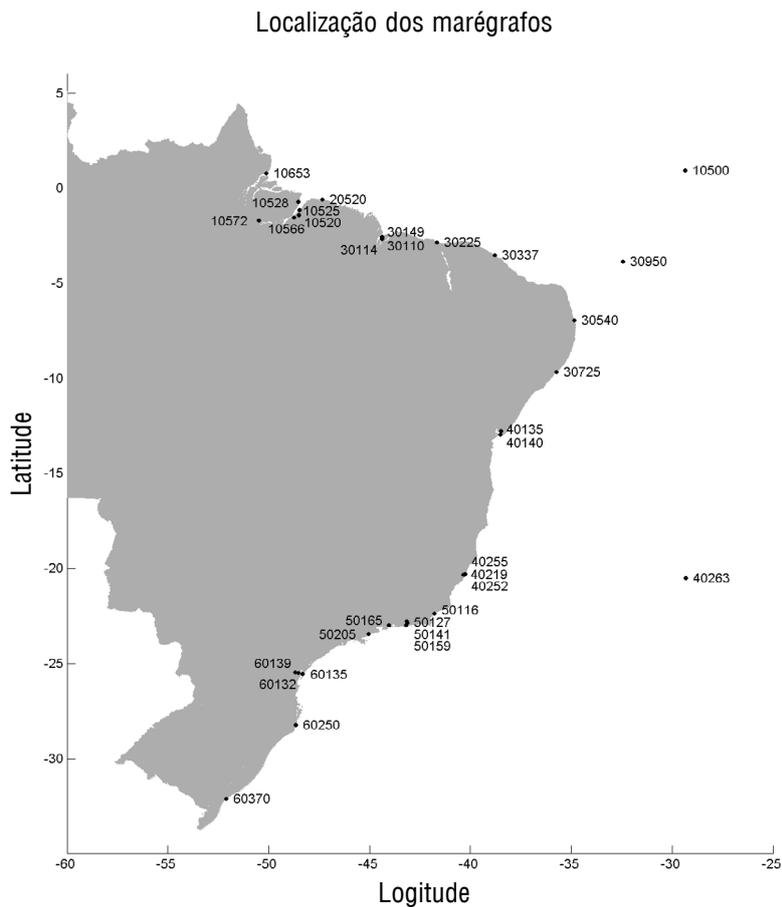


Figura 13: Marégrafos da base de dados da Marinha do Brasil/DHN localizados na costa do Brasil.

### 2.2.5.2. Metodologia de validação

O procedimento para a realização da validação dos dados é o seguinte:

- Uma análise harmônica foi realizada em cada um dos marégrafos, obtendo as componentes harmônicas (amplitudes e fases) da maré astronômica para cada um deles. A análise harmônica foi realizada usando a técnica desenvolvida por Foreman (1977) implementada no modelo *t\_tide* (PAULOWICZ *et al.*, 2007)
- Realizou-se a previsão da série de níveis de maré astronômica a partir das componentes harmônicas para um ano típico em todos os marégrafos. O ano base escolhido foi 2000.
- Foram selecionados os pontos da base de dados GOT mais próximos que cumpriam a condição de ter uma distância menor que 100 km dos marégrafos.
- Realizou-se a previsão da série de maré astronômica para o ano base nos pontos GOT selecionados.
- Os pares de série de previsão de maré astronômica do ano escolhido foram comparados por vários parâmetros estatísticos, descritos a seguir, bem como a função de distribuição.

### 2.2.5.2.1. Parâmetros estatísticos

Para quantificar a qualidade do ajuste entre os conjuntos de dados do SMC-Brasil com os dados medidos por marégrafos, utilizou-se um conjunto de parâmetros estatísticos definidos a seguir.

O viés (BIAS), que mede o desvio sistemático entre duas variáveis, e é definido como:

$$BIAS = \bar{x} - \bar{y} \quad (7)$$

O erro quadrático médio (RMSE, *Root Mean Square Error*) mede a precisão com que duas variáveis se parecem, tendo em conta tanto o quadrado do viés como a variância ou precisão entre elas, incluindo informações e momentos de ordem 1 e 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

O coeficiente de correlação da regressão, para o modelo de regressão (reta bissetriz) é chamado de coeficiente de correlação da reta bissetriz ( $\rho$ ). O coeficiente de correlação mede a intensidade da relação de igualdade entre duas variáveis e é definido entre 0 e 1, utilizando o último valor quando existe uma correlação perfeita entre ambas variáveis, ou seja, os valores de ambas são iguais.

$$\rho = \sqrt{R^2} \quad (9)$$

Onde  $R^2$  para este caso é a porcentagem de ajuste entre as duas variáveis:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 + (x_i - \bar{y}_i)^2} \quad (10)$$

O coeficiente de correlação de Pearson,  $r$ , que mede a relação linear entre duas variáveis aleatórias está definido entre -1 e 1, sendo que, quando é igual a 1 apresenta uma correlação positiva perfeita, e se for -1, é negativa perfeita e se é igual a 0, não existe uma correlação linear. Este coeficiente é definido por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

### 2.2.5.3. Resultados

#### 2.2.5.3.1. Validação dos dados dos marégrafos encontrados na página web da UHSLC

Entre os 20 marégrafos encontrados na base de dados da UHSLC, localizados na América Latina, apenas dois estão na costa Brasileira. Portanto, somente as séries destes marégrafos puderam ser utilizadas para validar a base de dados GOT incorporada no SMC-Brasil.

Para realizar a análise de validação dos dois marégrafos localizados fora da costa brasileira foram utilizadas duas constantes harmônicas do ponto mais próximo disponível na base de dados TPXO.

A metodologia de validação foi aplicada a partir destas constantes. Nas Figuras 14 a 17 se vê uma comparação entre as séries dos marégrafos e das bases de dados GOT do SMC-Brasil. Na parte superior esquerda das figuras se vê a localização do marégrafo (verde) e do ponto GOT com o qual é comparado (vermelho). No gráfico central das figuras se veem as séries previstas para o ano 2000 e na parte inferior um período de 15 dias, visando observar com mais detalhe o comportamento entre as duas séries. Finalmente, na parte superior direita se vê a série de RMSE.

Em todos os casos, séries muito semelhantes foram encontradas, sem diferenças e coincidências em ciclos semi-diurnos, diurnos e quinzenais. Os valores RMSE encontrados são sempre menores que 10 cm.

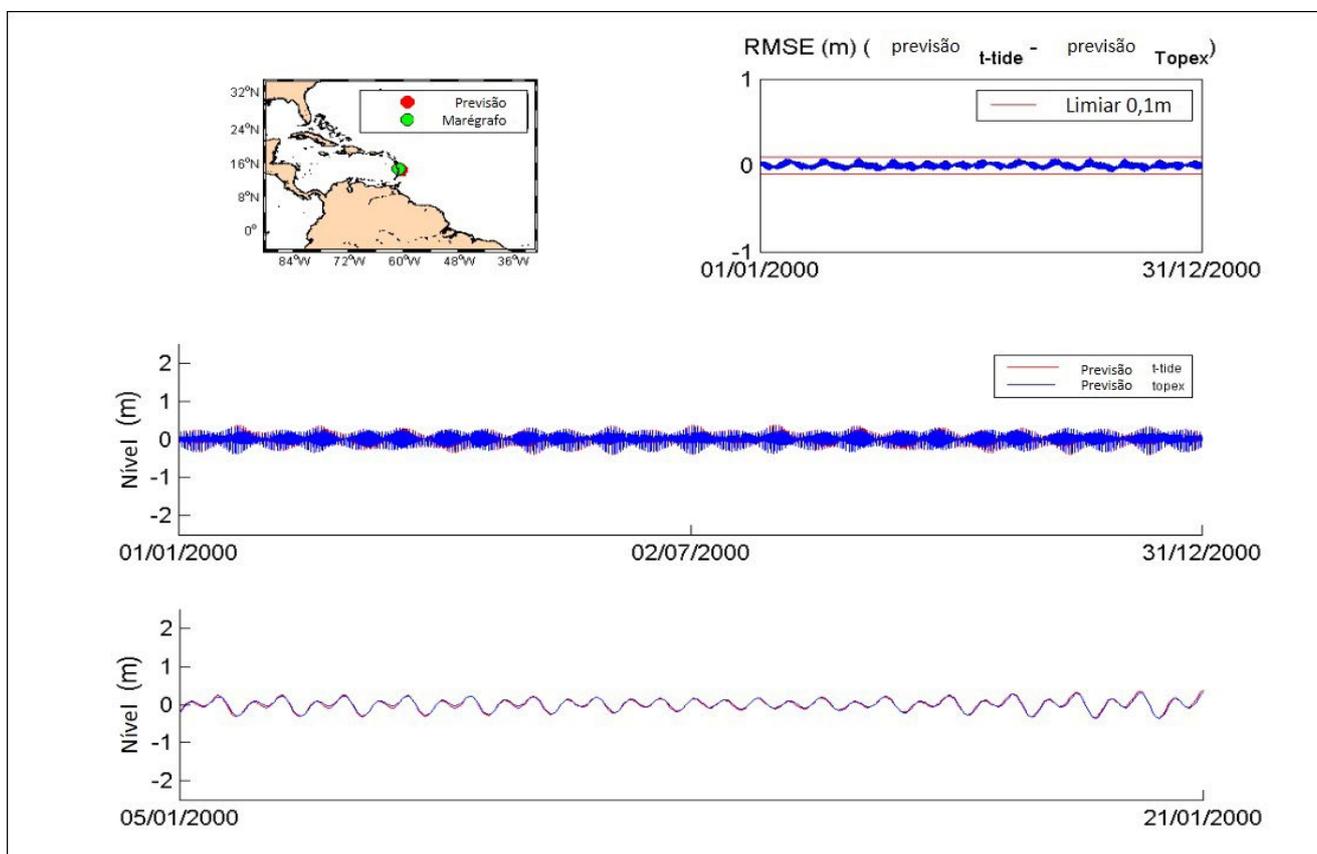


Figura 14: Validação da base de dados GOT com o marégrafo h27A da base de dados da UHSLC.

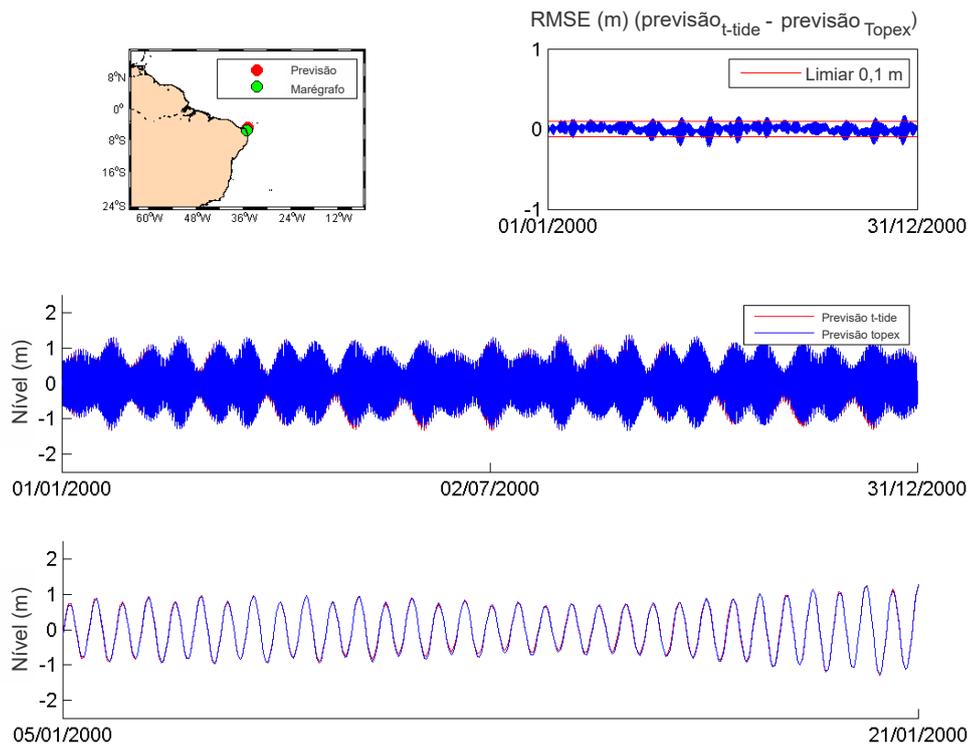


Figura 15: Validação da base de dados GOT com o marégrafo h202B da base de dados da UHSLC.

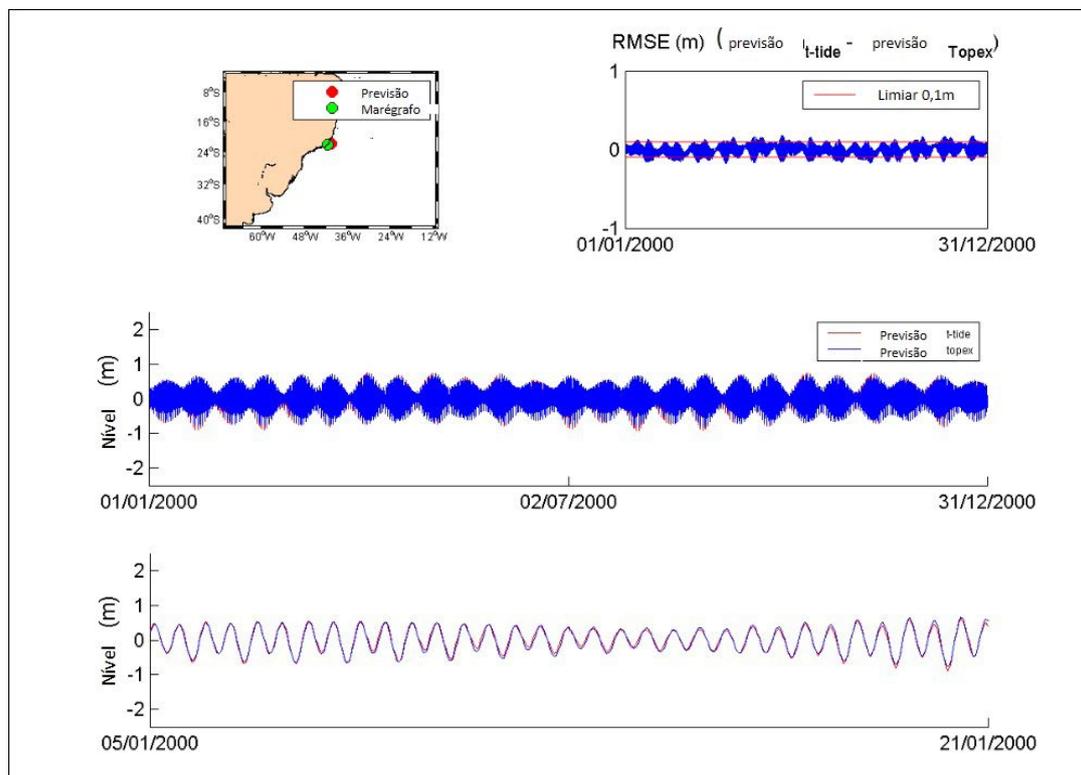


Figura 16: Validação da base de dados GOT com marégrafo h719A da base de dados da UHSLC.

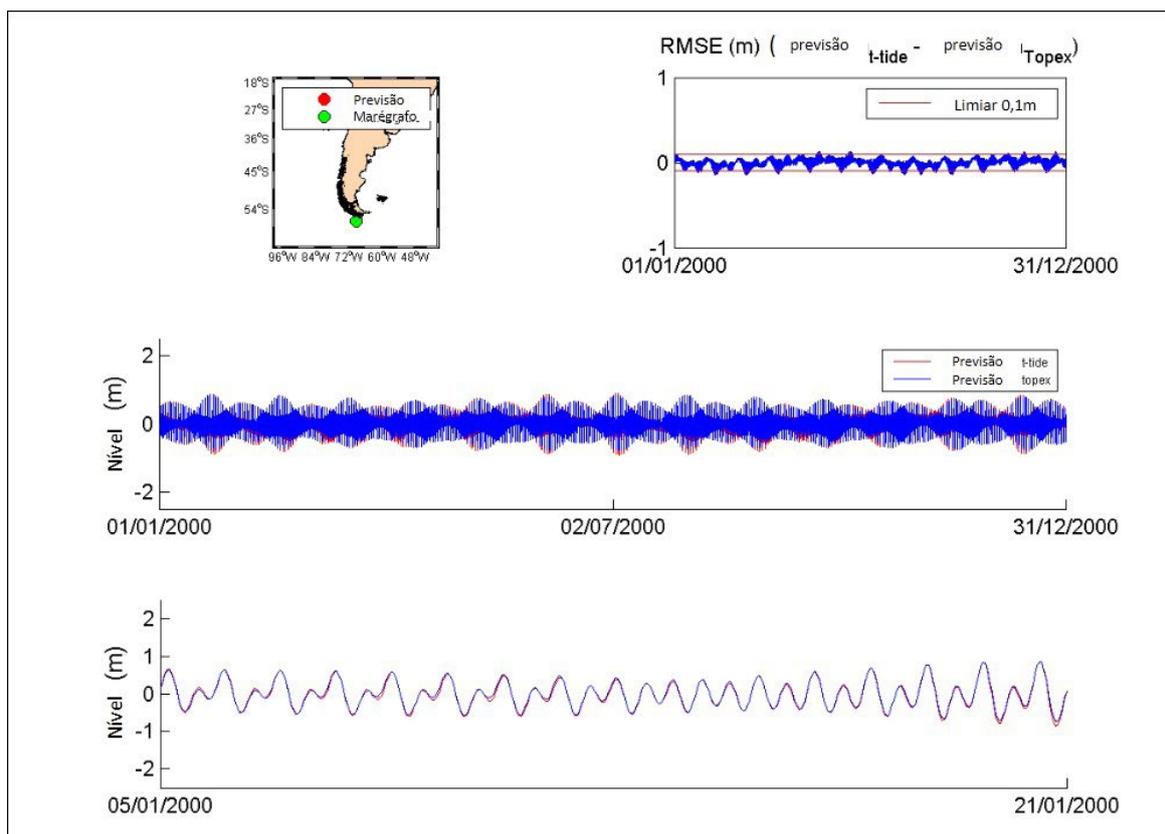
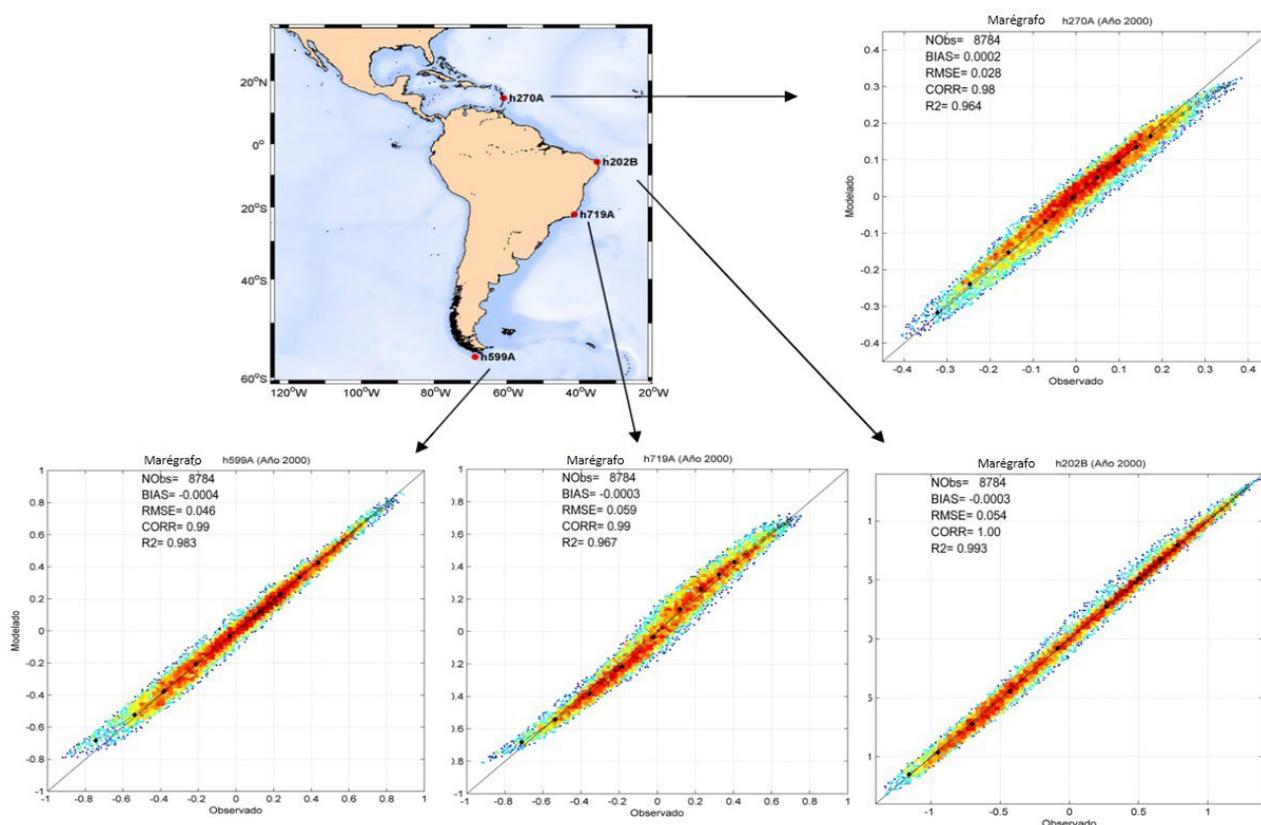


Figura 17: Validação da base de dados GOT com o marégrafo h599A da base de dados da UHSLC.

Para comparar o comportamento das séries de MA do GOT e dos marégrafos, na Figura 18, são mostrados diagramas de dispersão e coeficientes de correlação para cada um dos indicadores. Em todos os casos um ajuste adequado é observado, com coeficientes de correlação maiores do que 0,85.



**Figura 18:** Diagrama de dispersão nos pontos de validação. É apresentado também a comparação quantil-quantil, o viés (BIAS), o coeficiente de correlação  $R^2$ , o coeficiente de correlação de Pearson (CORR) e o erro quadrático médio (RMSE).

### 2.2.5.3.2. Validação com marégrafos da Marinha do Brasil/DHN

A análise de validação local foi realizada através da comparação de dados de marégrafos obtidos da Marinha do Brasil/DHN.

Numa primeira análise observou-se que, na base de dados encontram-se diferentes classes de marégrafos: 1) marégrafos interiores ou em estuários (I), 2) marégrafos na costa (C) e 3) marégrafos externos ou distantes da costa (E), ver Quadro 3.

**Quadro 3:** Características das séries de dados dos marégrafos. Classe dos marégrafos: (I) Marégrafos localizados em Interiores ou estuários; (C) Marégrafos na Costa e; (E) Marégrafos Externos ou distantes da costa.

Chave	Latitude	Longitude	Data Início	Data Final	Meses	Classe
10500	00° 55".2 N	29° 20".6 O	18/01/1993	22/03/1994	14	E
10520	01° 26".2 S	48° 29".6 O	02/03/1955	20/02/1956	12	I
10525	01° 09".9 S	48° 28".5 O	13/11/2010	21/01/2011	2	I
10528	00° 44".0 S	48° 31".0 O	19/11/2010	22/01/2011	2	I
10566	01° 32".4 S	48° 45".2 O	01/07/2010	30/06/2011	12	I
10572	01° 41".5 S	50° 29".0 O	08/07/1977	28/02/1978	8	I
10653	00° 45".7 N	50° 07".1 O	03/06/2008	03/11/2008	5	I
20520	00° 37".0 S	47° 21".0 O	01/01/1955	30/12/1955	12	C
30110	02° 34".6 S	44° 22".2 O	01/01/1985	31/03/1985	3	I
30114	02° 40".7 S	44° 21".8 O	06/07/1984	30/09/1984	3	I
30149	02° 33".9 S	44° 22".7 O	01/08/1991	31/07/1993	24	I
30225	02° 51".1 S	41° 38".7 O	04/02/1984	03/02/1985	12	C
30337	03° 32".1 S	38° 47".9 O	27/07/2000	28/08/2000	1	C
30540	06° 58".2 S	34° 50".4 O	18/01/1981	19/01/1982	12	C
30725	09° 41".0 S	35° 43".5 O	13/04/2006	13/04/2007	12	C
30950	03° 52".3 S	32° 25".5 O	01/01/1972	31/12/1972	12	E
40135	12° 47".8 S	38° 29".5 O	03/09/2003	03/12/2003	3	C
40140	12° 57".9 S	38° 31".0 O	02/01/1960	22/12/1960	12	C
40219	20° 19".3 S	40° 20".1 O	15/08/2003	28/10/2003	2	C
40252	20° 19".1 S	40° 17".8 O	04/12/2008	04/06/2009	6	C
40255	20° 17".3 S	40° 14".6 O	21/07/1991	12/09/1991	2	C
40263	20° 30".5 S	29° 18".6 O	01/01/1975	31/12/1975	12	E
50116	22° 23".1 S	41° 46".2 O	01/01/1996	31/12/1996	12	C
50127	22° 46".7 S	43° 09".5 O	19/03/2008	19/03/2009	12	C
50141	22° 53".0 S	43° 08".1 O	01/09/2003	31/08/2005	24	C
50159	22° 59".1 S	43° 11".3 O	13/03/2008	13/04/2008	1	C
50165	23° 00".0 S	44° 01".9 O	01/01/1980	31/12/1981	24	C
50205	23° 27".1 S	45° 02".8 O	01/01/1992	31/12/1992	12	C
60132	25° 30".1 S	48° 31".5 O	01/01/1997	31/12/1997	12	C
60135	25° 34".0 S	48° 19".0 O	01/01/1997	31/12/1997	12	C
60139	25° 27".3 S	48° 40".7 O	19/09/2000	19/11/2000	2	C
60250	28° 13".8 S	48° 39".0 O	01/01/1957	31/12/1957	12	C
60370	32° 07".4 S	52° 06".2 O	02/10/1959	21/09/1960	12	C

Para se realizar a validação da base de dados GOT só podem ser utilizados marégrafos localizados na costa ou no exterior, ou seja, de 33 só foram utilizados 24 marégrafos. Como explicado na seção 2.2.4, quando a onda de maré se propaga dentro de áreas estuarinas e muito rasas, é afetada pela profundidade, contornos, e atrito, produzindo a aparição de componentes de sobre-marés e marés compostas. As informações sobre estas componentes não estão incluídas na base de dados GOT, o que exclui completamente os marégrafos dentro de estuários para a validação.

A validação dos marégrafos costeiros e externos foi realizada utilizando a metodologia descrita anteriormente. A condição de não exceder a distância entre o marégrafo e o ponto GOT de mais de 100 km foi cumprida em todos os marégrafos do litoral e em apenas um externo.

As Figuras 19, 20 e 21 mostram três exemplos de resultados de validação na costa norte, centro e sul do Brasil. Cada figura inclui um mapa de localização da área em que se indica a posição do marégrafo e do ponto GOT selecionado. O gráfico no canto superior direito mostra o diagrama de dispersão e o coeficiente de correlação entre as duas séries, enquanto que na parte inferior se vê um segmento de ambas as séries temporais para se detectar possíveis desfaseamentos.

Os resultados de validação dos outros marégrafos estão no Anexo 1.

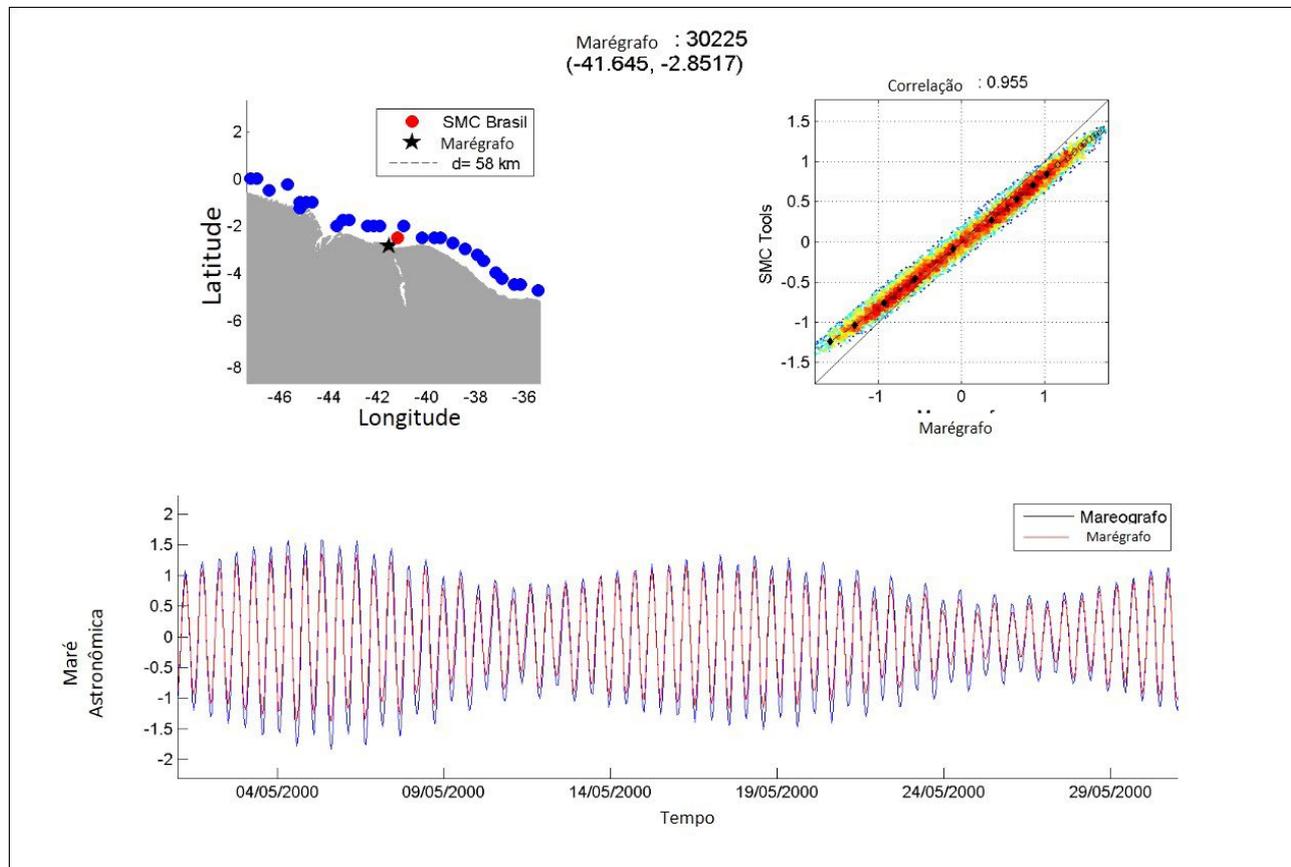


Figura 19: Validação da base de dados GOT com o marégrafo 30225 da base de dados da Marinha do Brasil.

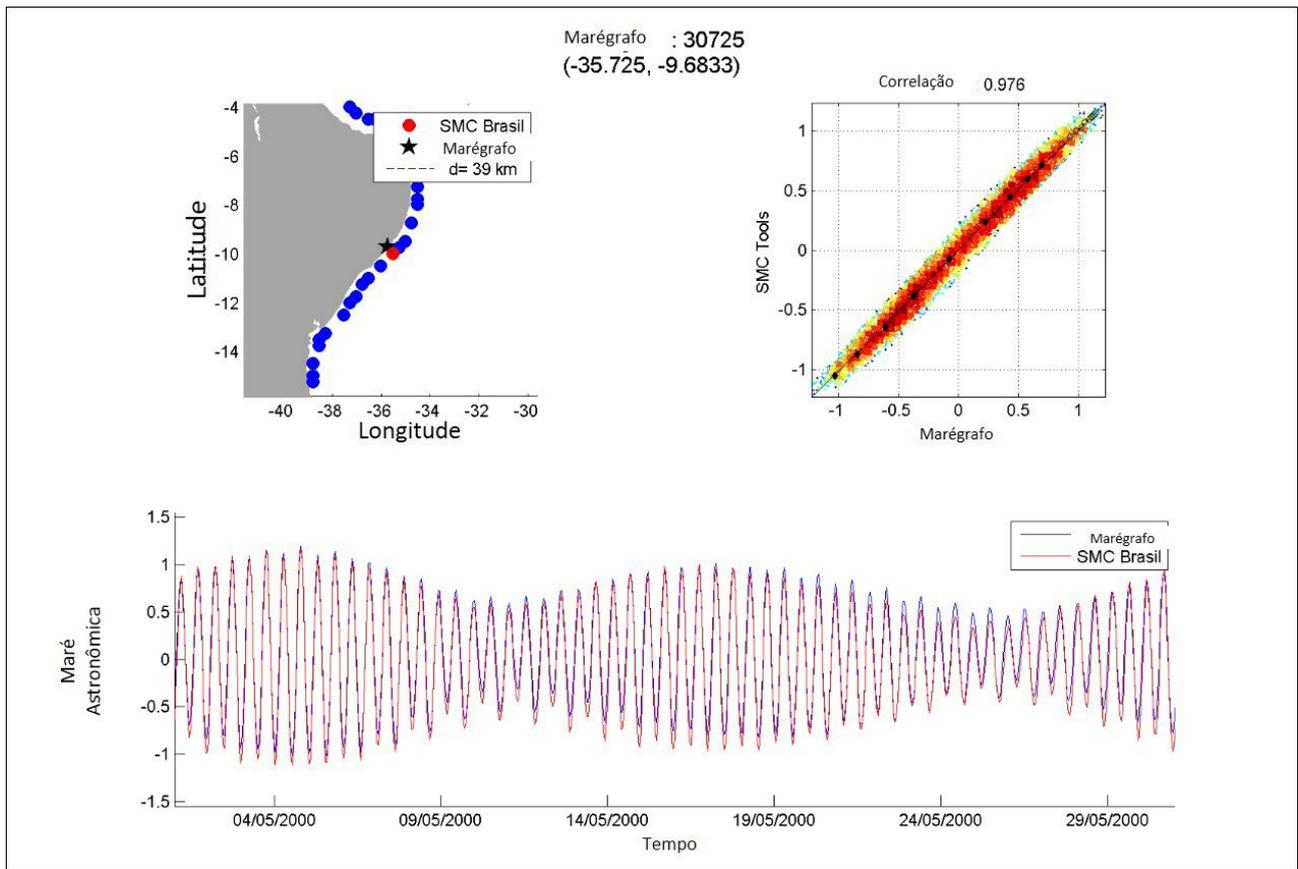


Figura 20: Validação da base de dados GOT com o marégrafo 30725 da base de dados da Marinha do Brasil.

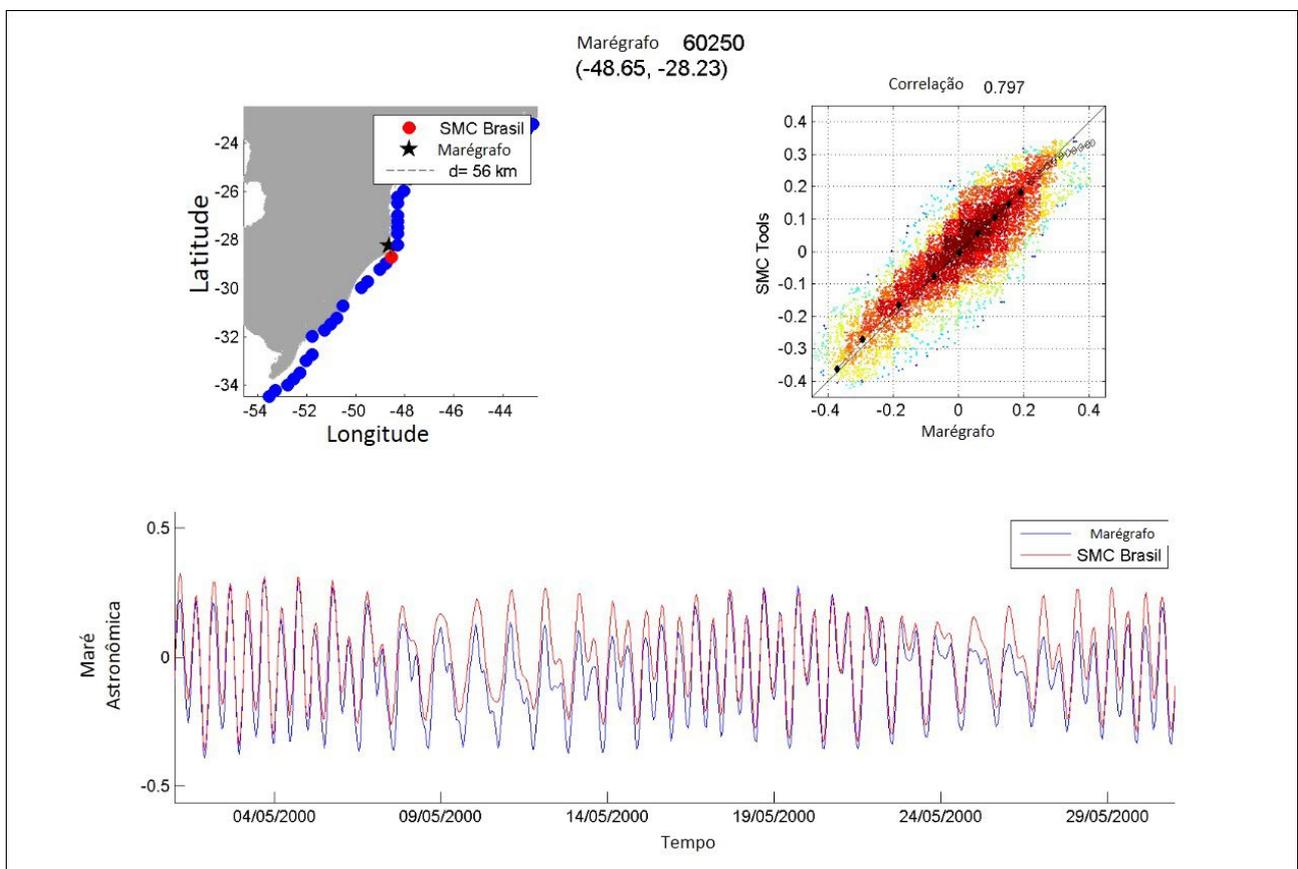


Figura 21: Validação da base de dados GOT com o marégrafo 60250 da base de dados da Marinha do Brasil.

#### 2.2.5.4. Conclusões da Validação

Realizaram-se análises de validação comparando as séries GOT com séries obtidas de marégrafos provenientes do Centro do Nível do Mar da Universidade do Haváí (UHSLC) e da Marinha do Brasil.

Entre os marégrafos da UHSLC apenas dois estão na costa brasileira, no entanto, para ampliar a zona de validação também foram utilizados dois outros marégrafos localizados um na zona do Caribe, ao norte do Brasil, e o segundo na região da Patagônia, no sul do Brasil. As constantes harmônicas dos marégrafos, fora do domínio da costa brasileira, foram obtidas diretamente da base de dados TPXO. Em todos os quatro casos foram obtidas correlações altas e erros quadráticos inferiores a 16 cm.

No caso da base de dados da Marinha do Brasil, foram utilizados 33 marégrafos, dos quais apenas 24, localizados na costa ou em pontos externos, foram utilizados para validar a base de dados. O resto, localizado dentro de estuários ou afastados em mais de 100 quilômetros dos pontos GOT foram descartados. Nos casos em que a validação ocorreu, valores de  $R^2$  maiores que 0,90 e erros quadráticos de cerca de 10 cm e inferiores a 20 cm foram obtidos. Por isso, se pode concluir que a base de dados GOT disponível no SMC-Brasil é adequada para reproduzir as características da onda de maré na costa.

#### 2.2.6. Caracterização da base de dados GOT disponível no SMC-Brasil

Uma vez validada a base de dados de maré astronômica GOT, esta informação foi utilizada para caracterizar a maré astronômica na costa do Brasil. Para isso, em cada ponto são calculadas as seguintes variáveis: 1) elevação máxima da maré astronômica (nível histórico máximo), 2) séries temporais da amplitude da maré (AM), 3) amplitude das marés superada em 50%, 10%, 5% e 1% dos casos, 4) amplitude da maré máxima para cada ano, e 5) desvio padrão das máximas anuais da amplitude da maré.

A Figura 22 traz como exemplo as funções de distribuição da elevação da maré em três pontos GOT, a) na zona norte, b) na zona central e, c) ao sul da costa brasileira. Nestes regimes pode-se ver como a elevação da maré é máxima no norte (da ordem de 4 m) e diminui gradualmente em direção à costa do sul do Brasil.

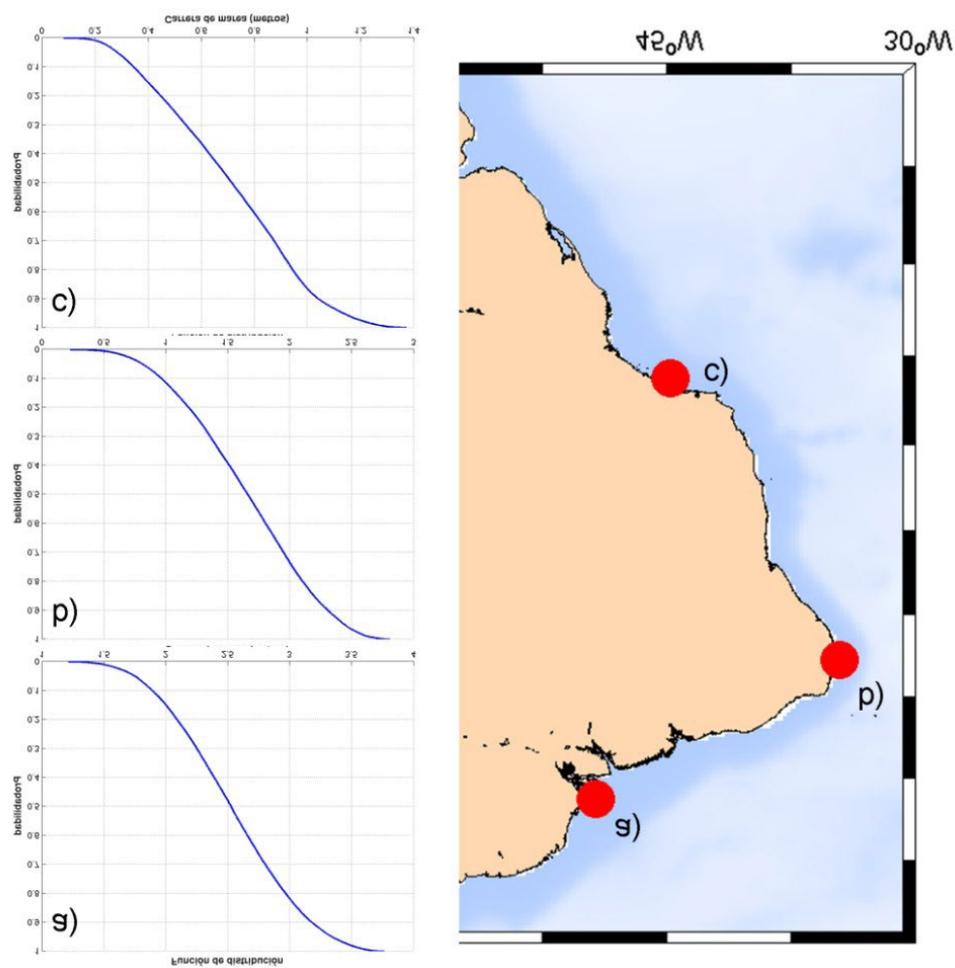


Figura 22: Funções de distribuição da elevação da maré astronômica ao longo da costa do Brasil. Se mostram 3 exemplos, ao a) norte, b) centro e c) sul da costa. Se observa como a elevação da maré diminui de norte a sul.

A Figura 23 mostra o valor de elevação da maré observada em cada um dos pontos GOT do SMC-Brasil. Neste gráfico se mostra claramente a diminuição da elevação de norte a sul. Cabe, porém, destacar a amplificação da elevação da maré ao norte do Maranhão com níveis máximos de mais de 3 m.

A elevação da maré só fornece informações sobre o nível atingido pela onda de maré a partir de um nível médio, não sendo fácil determinar este nível na costa. Por isso, é apropriado usar medições como a amplitude da maré para caracterizar o comportamento da maré na costa. A amplitude da maré é a diferença de nível entre as preamares e baixamares consecutivas. A Figura 24 mostra a amplitude máxima e a amplitude superada em 1%, 5% e 50% do tempo, que correspondente ao percentual de 99%, 95% e 50%.

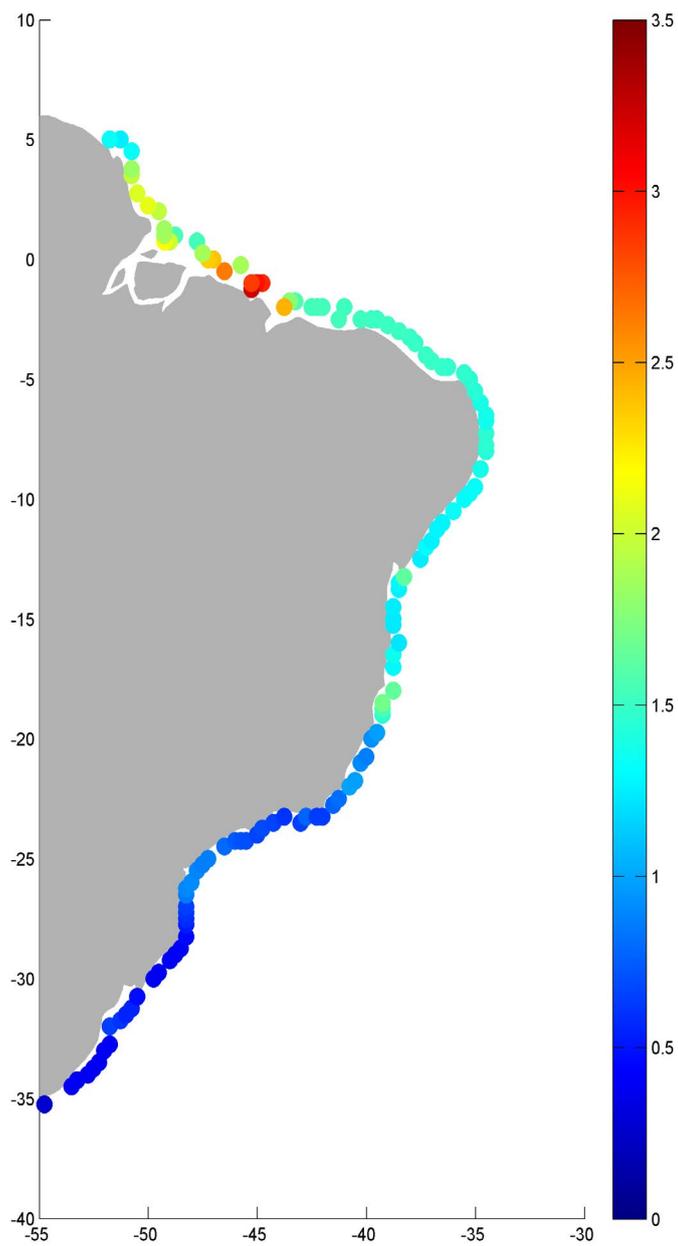


Figura 23: Elevação máxima da onda da maré astronômica obtida na base de dados GOT do SMC-Brasil. Elevações em metros.

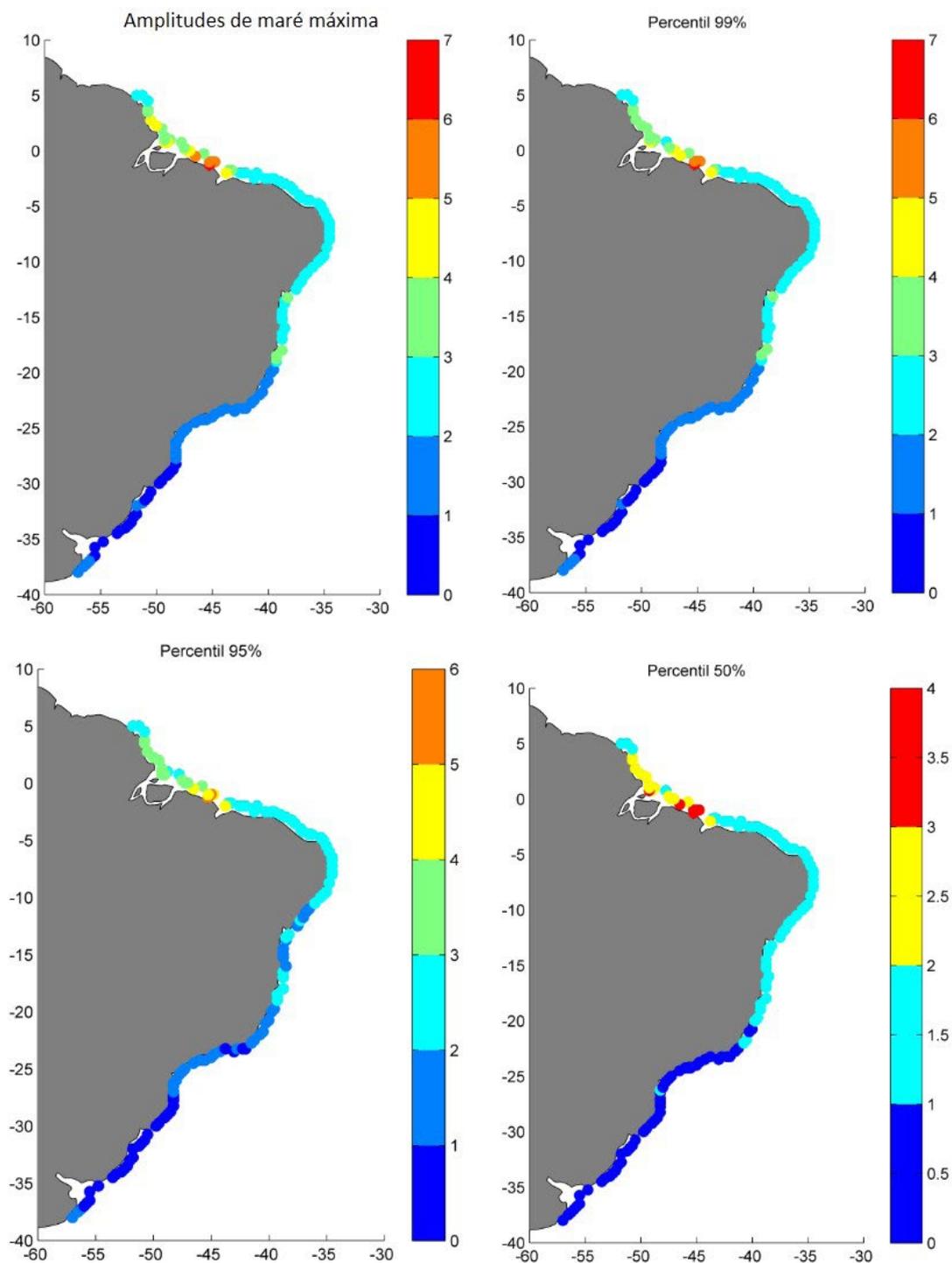


Figura 24: Amplitude da maré astronômica máxima e percentuais de 99%, 95%, e 50% da amplitude de maré astronômica, obtidas na base de dados GOT do SMC-Brasil. Amplitude em metros.

Nestas figuras pode-se ver uma zona norte macromareal com amplitudes máximas da ordem de 6 metros, que diminuem gradualmente em direção ao sul, onde o regime é micromareal, com amplitudes de cerca de 0,5 metros.

## 2.2.7. Conclusões

Nesta seção (2.2) descreveu-se os conceitos necessários para se entender o comportamento da onda de maré nos oceanos, particularmente em áreas próximas da costa. Também se explicou como a base de dados GOT de maré astronômica incluída no SMC-Brasil está constituída.

Esta base de dados é formada por um conjunto de séries de maré astronômica distribuídas ao longo da costa do Brasil. Cada uma destas séries foi prevista a partir de constantes harmônicas obtidas do modelo global de marés TPXO da Universidade de Oregon.

As séries GOT foram validadas através de comparações com séries de marégrafos na costa brasileira. Foram encontrados erros quadráticos da ordem de 10 cm e correlações superiores a 0,90. Assim, a confiabilidade da base de dados foi comprovada.

Ao final, se realizou uma descrição espacial da base de dados em termos de elevações e de amplitude das marés.

## 2.2.8. Limitações da base de dados

A base de dados GOT do SMC-Brasil foi gerada a partir das 10 constantes harmônicas obtidas com a simulação numérica global TPXO. Essas constantes harmônicas correspondem às principais forçantes lunares e solares da maré astronômica, que funcionam muito bem em áreas afastadas da costa. No entanto, em áreas onde a configuração topo-batimétrica afeta a propagação da onda de maré, por exemplo, dentro de estuários ou baías muito estreitas, pode-se encontrar diferenças entre os dados de base GOT e dados *in situ*.

## 2.3. Base de dados da Maré Meteorológica

### 2.3.1. Introdução

Este capítulo fornece uma descrição da reanálise regional da maré meteorológica, desenvolvido no âmbito do projeto “Efeitos das mudanças climáticas sobre a costa da América Latina e do Caribe (C3A)” utilizado para se gerar a base de dados de maré meteorológica incluídos no SMC-Brasil.

O projeto C3A foi financiado pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL). Neste projeto foi desenvolvida uma metodologia específica para a avaliação dos impactos das alterações climáticas nas zonas costeiras. A metodologia e as ferramentas são úteis para avaliar os impactos, planejar medidas de adaptação e realizar uma análise econômica das mesmas.

Os resultados deste projeto foram publicados em seis documentos que abordam tópicos tão diversos como a análise dos agentes, o estudo da vulnerabilidade costeira, a avaliação dos impactos derivativos e a integração de todos os fatores na avaliação de riscos associados aos impactos estudados.

A base de dados de maré meteorológica incluída no SMC Tools é uma seleção de séries de reanálise regional, localizadas ao longo da costa brasileira. Esta base de dados será chamada de GOS (*Global Ocean Surge*).

O conteúdo desta seção (2.3) se divide em três partes: Na primeira parte é feita uma descrição sobre a base teórica que explica o que a maré meteorológica, como ela ocorre e como pode ser simulada. Na segunda parte se explica como foi gerada a base de dados incluída no SMC-Brasil e, finalmente são descritas as características gerais da maré meteorológica no Brasil, com ênfase no comportamento espacial.

## 2.3.2. A maré meteorológica

### 2.3.2.1. O que é a maré meteorológica?

A maré meteorológica ou *storm surge* é uma oscilação do nível do mar causada por efeitos meteorológicos principalmente derivados do vento e de variações nos campos de pressão. As maiores elevações das marés meteorológicas estão associadas com eventos de tempestades ou tormentas, que geralmente coincidem com as maiores ondas.

Esta sobre-elevação é um dos componentes que determina o nível do mar total e, a sua importância relativa em relação à maré astronômica e outros fatores depende da área geográfica analisada. Em certas circunstâncias pode ser de grande importância, sobretudo para determinar a elevação máxima do nível do mar em situações de tempestades. As maiores elevações ocorrem em áreas com grandes plataformas continentais. Essa oscilação costuma ter períodos que variam de vários minutos a dias.

A importância da maré meteorológica reside no fato de que, se uma elevação significativa coincidir com marés astronômicas de sizígia e ondas de tempestades, poderão ocorrer grandes inundações na zona costeira.

### 2.3.2.2. Como é gerada a maré meteorológica?

A maré meteorológica ocorre principalmente pelas variações de campos de pressão atmosférica e correntes do vento. Nesta seção a influência de cada um desses mecanismos é analisada em detalhe.

#### 2.3.2.2.1. Influência de campos de pressão atmosférica

A pressão atmosférica induz alterações no nível do mar devido ao peso do ar. Se o peso do ar aumenta, o nível do mar diminui, no entanto, se o peso do ar diminui o nível do mar aumenta. Este fenômeno é conhecido como barômetro invertido.

Estas variações são devidas a um equilíbrio existente entre a pressão atmosférica ( $P_a$ ) e a pressão exercida pela coluna de água, de tal modo que:

$$P_a + \rho gH = cte \quad (12)$$

Onde  $H$  é a altura da coluna de água, dada por  $H=h+\eta$ ,  $h$  é a profundidade do oceano e  $\eta$  é a elevação da superfície livre do nível do mar,  $\rho$  é a densidade da água do mar ( $1026 \text{ kg/m}^3$ ) e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Caso se permita que a Equação 12 varie no tempo, se obtém:

$$\frac{dPa}{dt} + \rho g \frac{d\eta}{dt} = 0 \quad (13)$$

De tal forma que as mudanças na elevação da superfície livre são dadas por:

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{1}{\rho g} + \frac{dPa}{dt} \quad (14)$$

Agora, caso se suponha uma tormenta com simetria radial em que a pressão atmosférica decresce exponencialmente ao distanciar-se de seu centro, de tal modo que

$$P_a(x) = P_e - (P_e - P_0) \left[ 1 - \exp\left(\frac{R-x}{x}\right) \right], \quad r \geq 0 \quad (15)$$

em que  $P_a(x)$  é a pressão a um ponto de uma distância  $x$  do centro da tormenta,  $P_e$  é a pressão do lado externo da tormenta,  $P_0$  é a pressão no centro da tormenta, e  $R$  o raio da tormenta. Deste modo, a substituição na equação 15 mostra que:

$$\eta(x) + \frac{P_a(x)}{\rho g} = cte, \quad (16)$$

De tal forma que:

$$\Delta\eta = 9,85(P_e - P_0) \left[ 1 - \exp\left(\frac{R-x}{x}\right) \right] \quad (17)$$

Portanto, tomando como exemplo, uma tormenta com características:

$$P_0 = 0,97 \text{ bar}$$

$$P_e = 1013 \text{ bar}$$

$$R \sim 1000 \text{ km}$$

Para diferentes valores de  $x$  têm-se:

$x$ (km)	0	300	700	1000
$\Delta\eta$ (m)	0,42	0,25	0,17	0

### 2.3.2.2.2. Influência do arrasto do vento

A ação contínua do vento sobre a superfície da água do mar pode causar seu arrasto. Se este arrasto ocorre na direção da costa, a água se acumula nela, produzindo um aumento do nível médio do mar.

Esta elevação do nível médio depende da intensidade do vento, trajetória, duração, a forma da costa, sua configuração, a rugosidade de fundo e assim por diante.

Este fenômeno pode ser explicado com uma forma simplificada das equações da continuidade e da quantidade de movimento. Esta simplificação é obtida por uma média vertical destas equações, onde:

$$\frac{\partial \eta_v}{\partial x} = \frac{(\tau_s + \tau_b)}{\rho g H} \quad (18)$$

$\eta_v$  é a elevação devido ao vento;  $\tau_s$  é a tensão tangencial devido ao vento;  $\tau_b$  é a tensão tangencial devido ao atrito com o fundo;  $g$  é a gravidade e  $H$  é a profundidade.

A integração da equação acima, no caso de profundidade constante e expressando as tensões tangenciais como uma função da velocidade do vento, indica o resultado:

$$\eta = h \left[ \sqrt{\frac{2kW^2x}{gh^2} + 1} - 1 \right] \quad (19)$$

Onde  $\eta$  é a sobre-elevação do nível do mar na linha de costa;  $k$  é o coeficiente (= 3,3e-6);  $W$  é a velocidade do vento (m/s),  $h$  é a profundidade e  $x$  é a distância horizontal sobre a qual sopra o vento.

Como exemplo, para um vento de 70 km/h, fixando  $h = 5$  m e soprando sobre uma lâmina de água de 3000 m a sobre-elevação que se produz é de 8 cm.

### 2.3.2.3. Como se comporta a maré meteorológica nos oceanos?

As massas de ar na atmosfera e o vento que produzem essas subidas e descidas não estão distribuídas uniformemente ao longo do oceano, mas variam na sua posição, forma, intensidade e duração, de modo que os seus efeitos sobre a superfície do mar também mudam. Estas alterações resultam em oscilações da superfície do mar, com períodos que podem ser horas, dias ou mesmo sazonais.

A relação que existe entre a MM e as forçantes é complexa em comparação com a MA. Apesar disso se pode aceitar que, na presença de tormentas ou tempestades, se produzam elevações do nível do mar, tanto pelo efeito dos gradientes de pressão quanto pela força do vento.

### 2.3.2.4. Como se pode determinar a maré meteorológica?

Nos subitens anteriores mostrou-se como o efeito individual de variações de pressão e a força do vento produzem sobre-elevações no nível do mar, porém a maré meteorológica é o resultado da combinação de ambos os efeitos. Esta combinação é complexa, devido às interações não lineares. Portanto, para compreender o comportamento da MM é necessário o uso de modelos numéricos que solucionem as equações como o de Navier-Stokes e que determinem a elevação da superfície livre do mar, resultado dos agentes anteriormente mencionados.

Os resultados dessas simulações devem ser validados, contrastando-os aos dados reais medidos. As medições da elevação da MM podem ser obtidas através dos marégrafos situados na costa. O procedimento consiste em eliminar a elevação produzida pela MA do registro de um marégrafo realizando-se a análise harmônica (como explicado na seção 2.2.2.4). Desta forma, o resíduo ou o

resultado da diferença entre a série do marégrafo e a série prevista por análise harmônica é tudo aquilo que não pode ser relacionado com a MA e, portanto, é chamado de maré meteorológica. A Figura 25 mostra o exemplo do registro de um marégrafo (azul), a série de maré astronômica prevista (vermelho) e a série de maré meteorológica obtida (preto).

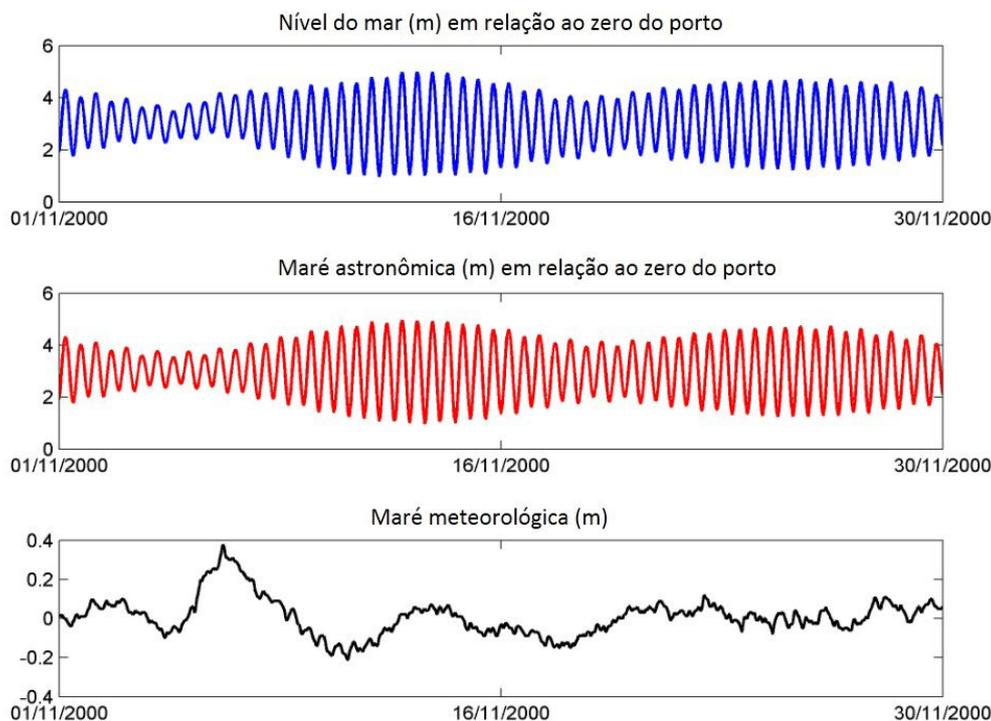


Figura 25: Exemplo de série de nível do mar registrada por um marégrafo (acima), a maré astronômica (centro) e a maré meteorológica (abaixo).

### 2.3.2.5. Para que se utiliza a maré meteorológica no SMC-Brasil?

A elevação produzida pela maré meteorológica é de grande importância para se determinar os níveis máximos de inundação alcançados na costa e assim delimitar a zona de inundação.

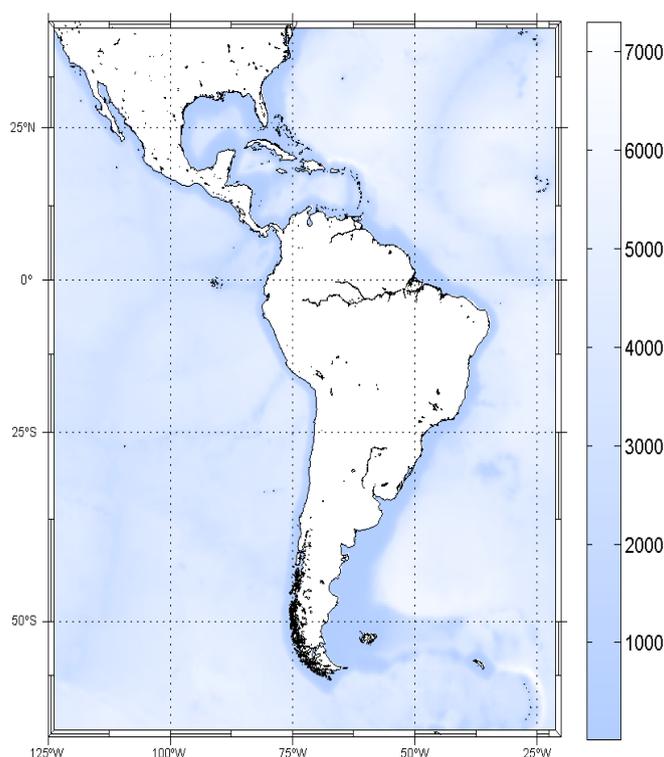
No SMC-Brasil se utiliza a elevação da maré meteorológica para determinar a cota de inundação. A terceira parte desta seção explica como esses resultados são obtidos.

### 2.3.3. Metodologia utilizada para gerar a base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil.

Como mencionado anteriormente, a base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil procede da reanálise GOS (*Global Ocean Surge*), realizada na América Latina e no Caribe. Esta base de dados contém séries horárias de maré meteorológica de 60 anos de duração (1948-2008) simuladas numericamente com o modelo tridimensional de circulação *Regional Ocean Modeling System* (ROMS), desenvolvido pelo *Ocean Modeling Group* de Rutgers, sendo amplamente aceito pela comunidade científica (HAIDVOGEL *et al.*, 2000; MARCHESIELLO *et al.*, 2003; PELIZ *et al.*, 2003; DI LORENZO, 2003; DINNIMAN *et al.*, 2003; BUDGELL, 2005; WARNER *et al.*, 2005a, b; WILKIN *et al.*, 2005).

O modelo ROMS resolve de forma numérica as equações primitivas, onde se presume que a pressão segue a lei hidrostática. As equações primitivas abrangem as equações de conservação de quantidade de movimento, conservação da massa, transporte de diferentes substâncias, tais como temperatura e salinidade e a equação de estado.

A simulação foi realizada no modo barotrópico (2D-horizontal) sobre uma malha de grade de resolução de  $0,25^\circ$ . A batimetria utilizada na geração da malha foi obtida a partir da base de dados ETOPO2 (*National Geophysical Data Center*, NOAA). Esta base de dados é um modelo digital global que integra topografia em terra e batimetria oceânica com uma resolução de 2 minutos. A Figura 26 mostra a malha utilizada na simulação.



**Figura 26:** Batimetria utilizada na elaboração de reanálise de maré meteorológica na zona de estudo. Malha 1 (resolução:  $0,25^\circ$ ).

A simulação foi forçada por campos de vento global a 10 m de altura e pressão do nível do mar (SLP) com resolução temporal de seis horas e espacial de  $1,9041^\circ$  de latitude e  $1,875^\circ$  de longitude, provenientes do Centro NCEP/ NCAR nos EUA. Estes dados abrangem, de forma completa e homogênea, o período de 1948-2008 e são atualizados mês a mês.

Quanto às condições de contorno, utilizou-se a condição de barômetro inverso, usando os valores de pressão do NCEP/NCAR.

A base de dados de maré meteorológica GOS abrange de 1948 a 2008, com resolução temporal horária. Os resultados obtidos são o aumento do nível do mar por maré meteorológica para o domínio de cálculo (ver Figura 25) com resolução espacial de  $0,25^\circ$ . Portanto, têm-se séries temporais de evolução da elevação do nível do mar, produto dos efeitos meteorológicos em cada

nó da malha. As Figuras 27 e 28 apresentam dois exemplos de resultados de superfície livre em diferentes áreas de uma determinada data.

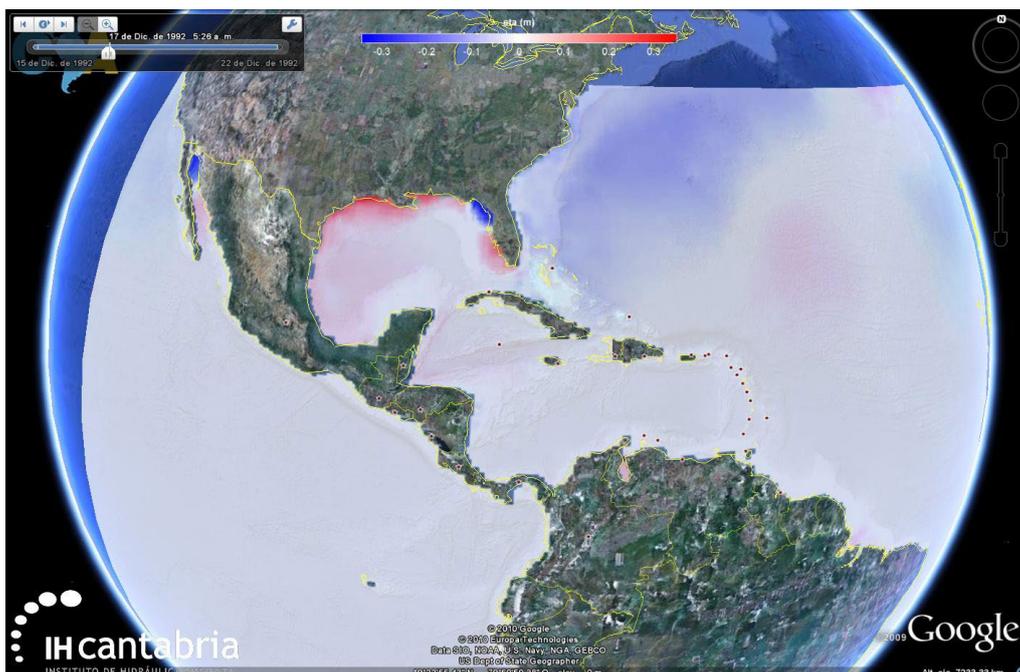


Figura 27: Resultados da reanálise GOS de elevação da superfície livre decorrente da maré meteorológica para a data 17/12/1992, 5:30. Golfo do México e Caribe.

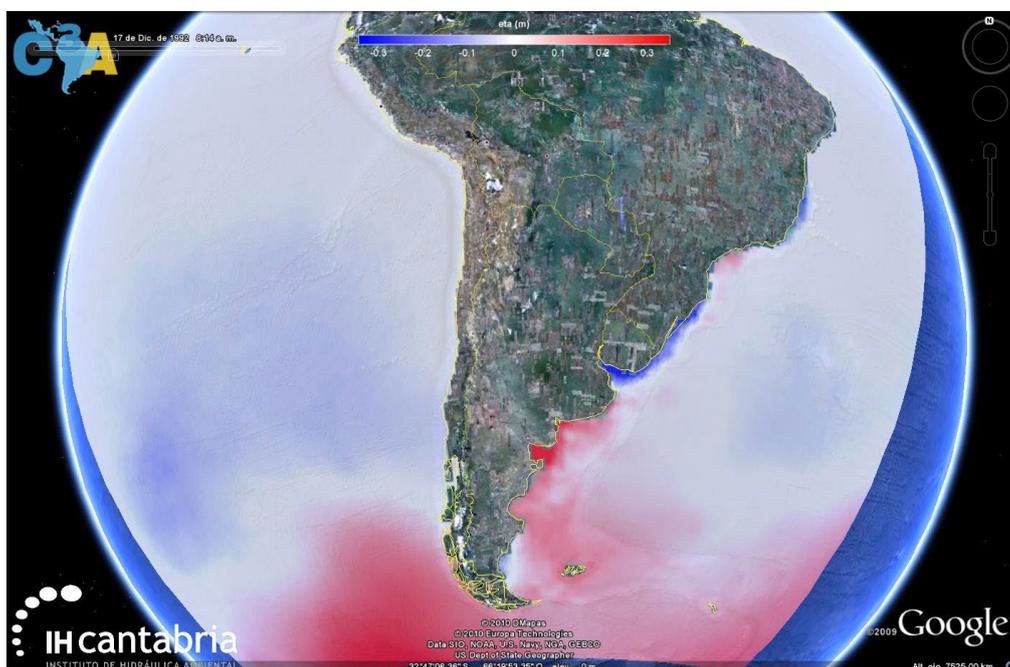


Figura 28: Resultados da reanálise GOS de elevação da superfície livre decorrente da maré meteorológica para a data 17/12/1992, 6:15. América do Sul.

### 2.3.4. Descrição da base de dados de maré meteorológica no SMC-Brasil

A base de dados de maré meteorológica incluída no SMC-Brasil é formada por séries temporais de um conjunto de pontos da reanálise GOS selecionados ao longo da costa do Brasil.

A seleção dos pontos foi realizada considerando que a maré meteorológica varia suavemente (ver Figuras 27 e 28) ao longo da costa brasileira e considerando as áreas utilizadas no desenvolvimento do documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017).

Portanto, a base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil tem 24 pontos distribuídos por toda a costa brasileira, espaçadas em uma distância média de 100 km.

A Figura 29 mostra a distribuição dos pontos selecionados ao longo da costa brasileira.

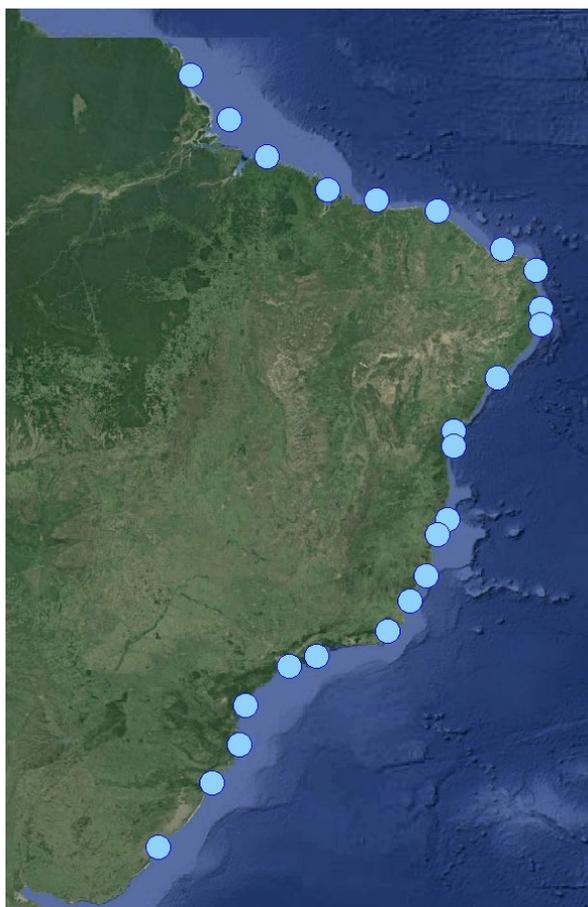


Figura 29: Pontos selecionados para a geração da base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil.

### 2.3.5. Validação da base de dados de maré meteorológica

A fim de verificar a confiabilidade dos dados foi realizada a validação da base de dados de maré meteorológica GOS. A validação foi feita comparando-se a base de dados GOS com dados instrumentais de marés meteorológicas obtidas a partir de marégrafos.

Os dados disponíveis para validação estão descritos neste capítulo, bem como a metodologia utilizada e os resultados encontrados.

### 2.3.5.1. Dados disponíveis para a validação

Para se realizar a validação da base de dados de MM foram utilizados os marégrafos usados na validação da base de dados de MA descritos na seção 2.2.5.1. Foram selecionados marégrafos localizados a uma distância inferior a  $0,5^\circ$  ( $\sim 55$  km) do ponto GOS. Porém, diferentemente da MA, para se validar as séries de MM é necessário que os registros tenham vários anos de duração.

Dessa forma, apenas quatro marégrafos que cumprem os requisitos descritos anteriormente (proximidade e ampla longitude temporal) são encontrados na costa do Brasil, estando estes nas bases de dados encontradas na página *web* da UHSLC.

A Figura 30 mostra a localização e identificação dos marégrafos na costa brasileira, usados na validação.

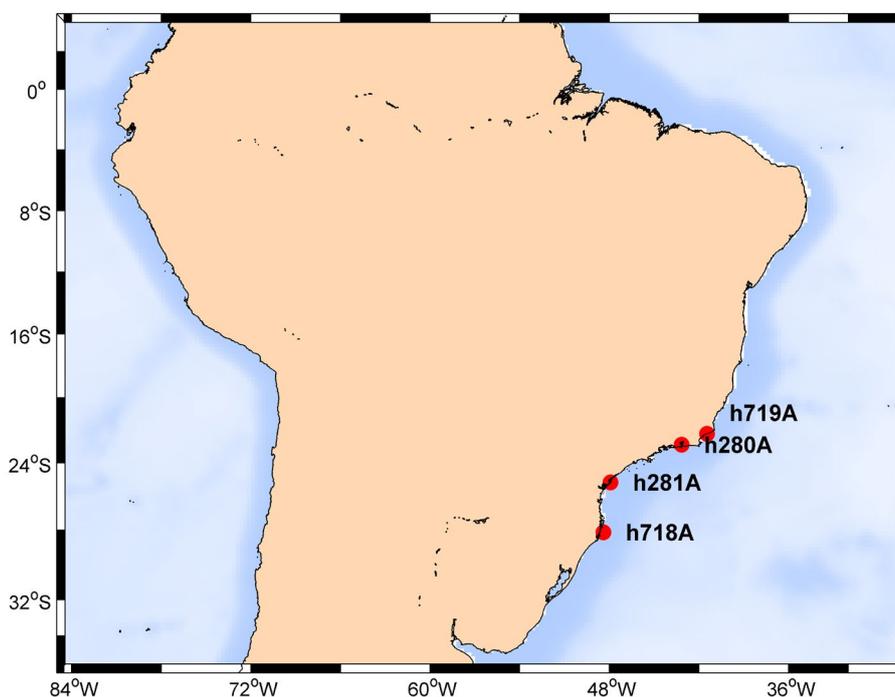


Figura 30: Localização dos marégrafos utilizados na validação da base de dados GOS na costa Brasileira.

### 2.3.5.2. Metodologia de validação

As validações foram realizadas por meio de comparações diretas entre as séries de simulação numérica GOS e as séries obtidas a partir de marégrafos.

Os marégrafos medem a elevação do nível do mar resultante da combinação da elevação produzida pela maré astronômica e a elevação da maré meteorológica. Para realizar as validações é necessário encontrar a elevação produzida apenas pela maré meteorológica, ou seja, eliminar a maré astronômica das séries de nível do mar.

Este procedimento foi realizado utilizando os seguintes passos:

1. Realizou-se a análise harmônica da série de elevações do marégrafo, de onde se obteve as constantes harmônicas correspondentes às frequências mais importantes da maré astronômica. A análise harmônica foi realizada com a aplicação da técnica desenvolvida por Foreman (1977) implementada no modelo  $t\_tide$  (PAWLOWICZ *et al.*, 2007).
2. Realizou-se a previsão da maré astronômica para o mesmo período observado no marégrafo. A previsão foi realizada aplicando as constantes obtidas previamente.
3. Calculou-se a diferença entre o registro do marégrafo e a previsão de maré. Este resíduo corresponde à série de maré meteorológica medida pelo marégrafo.

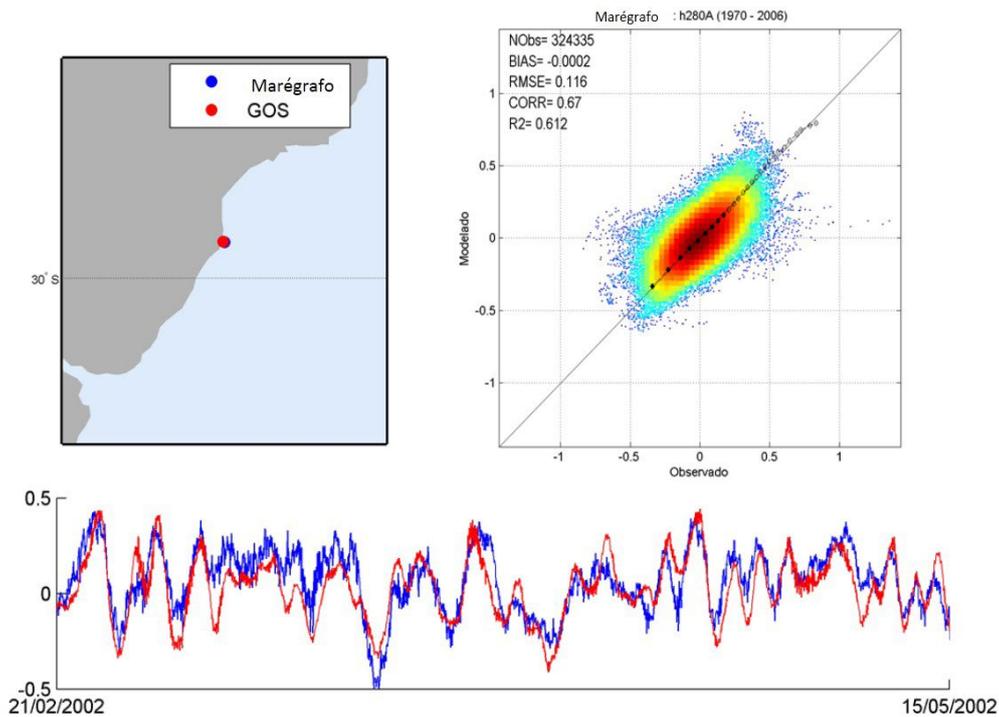
As validações foram realizadas por meio de diagramas de dispersão e comparações quantil-quantil entre as séries. Além disso, quantificou-se a precisão pelo cálculo dos valores de correlação ( $R^2$ ), o viés (BIAS), o coeficiente de correlação de Pearson (CORR) e o erro quadrático médio (RMSE) conforme definido na seção 2.2.5.2.1, utilizando a totalidade dos registros dos marégrafos.

### 2.3.5.3. Resultados da validação

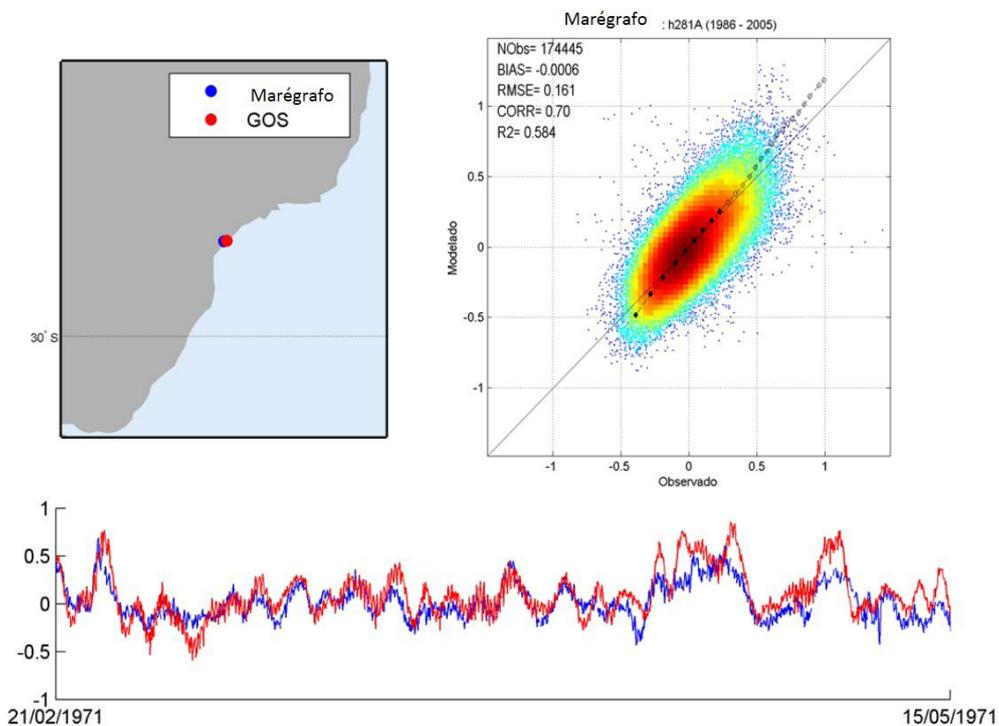
Nas Figuras 31 a 34 os resultados da validação da base de dados GOS são apresentados.

Nestas Figuras é representada a localização do marégrafo e do ponto GOS (gráfico superior esquerdo) e a comparação da série de maré meteorológica registrada pelo marégrafo (azul) e a obtida a partir do GOS (vermelho). No gráfico superior direito se nota o diagrama de dispersão ou *scatter plots* dos dados GOS mostrados no marégrafo e a comparação quantil-quantil. Além disso, se indicam o coeficiente de correlação em relação à bissetriz ( $R^2$ ), o viés (BIAS), o coeficiente de correlação (CORR), o erro quadrático médio (RMSE) e o número de observações (NObs) utilizadas na análise estatística. Os parâmetros foram calculados com a totalidade do registro de cada marégrafo.

Se pode observar uma boa relação entre a série registrada pelos marégrafos e a série GOS, com valores de RMSE de aproximadamente 10 cm. O viés é mantido próximo de 0 e o coeficiente de correlação de Pearson varia entre 0,6 e 0,7.



**Figura 31:** Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h280A (1970-2006). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil e resultados estatísticos.



**Figura 32:** Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h281A (1986-2005). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil, e resultados estatísticos.

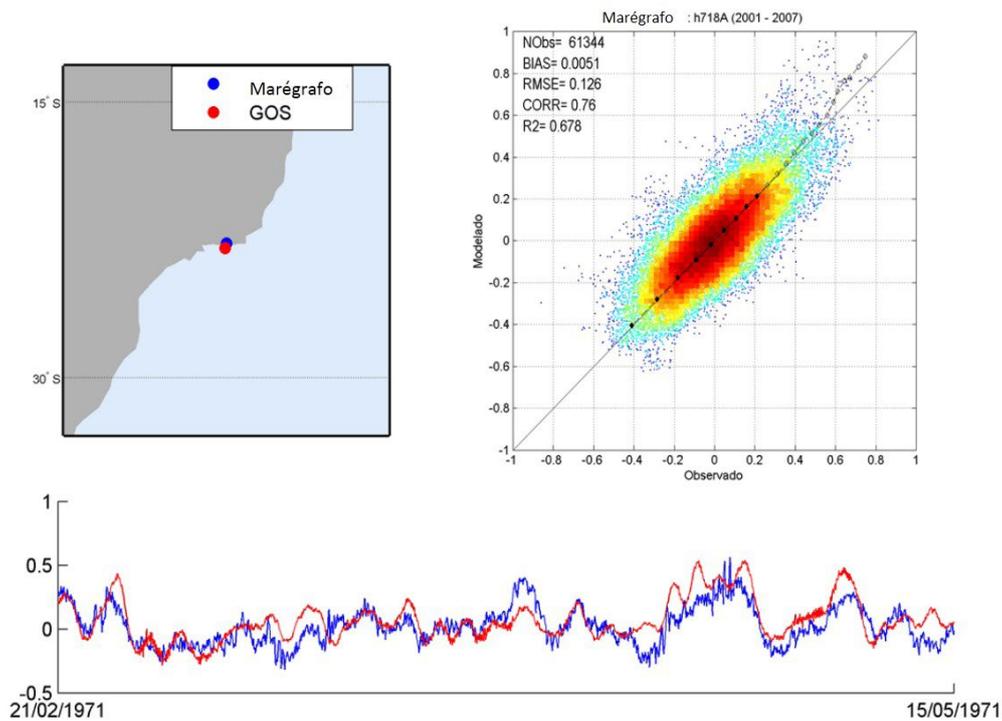


Figura 33: Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h718A (2001-2007). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil, e resultados estatísticos.

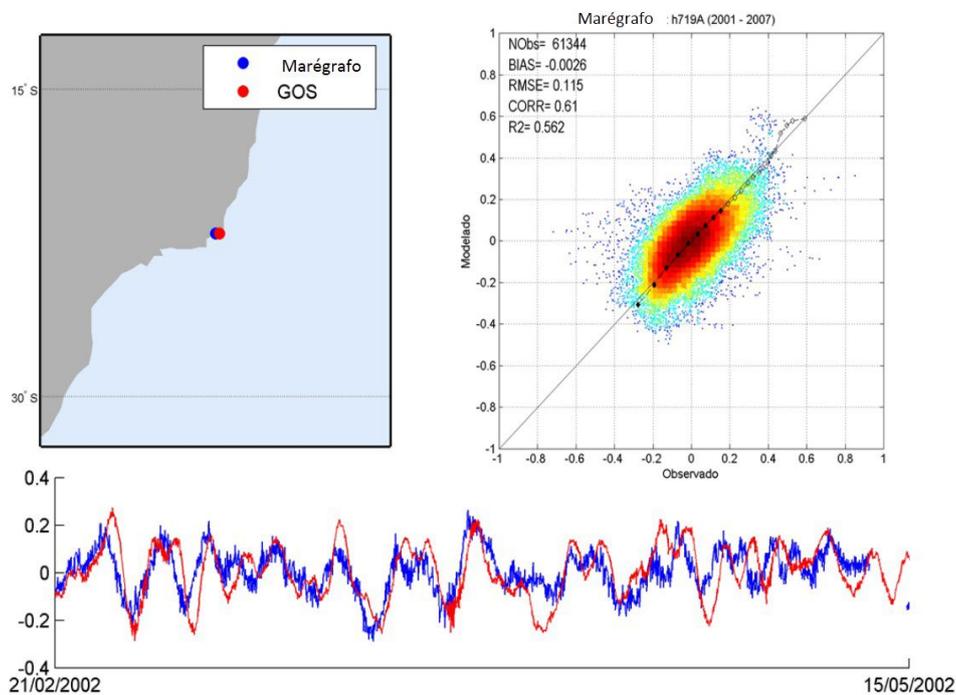


Figura 34: Validação da série de maré meteorológica GOS com o marégrafo h719A (1970-2006). Pode – se observar: (A) A localização do marégrafo (azul) e do ponto GOS (vermelho), (B) A comparação das séries temporais do marégrafo (azul) e o ponto GOS (vermelho) e (C) O diagrama de dispersão, comparação quantil-quantil, o viés (BIAS) e os resultados estatísticos.

#### 2.3.5.4. Conclusões da validação

A validação foi realizada com o objetivo de comprovar a confiabilidade da base de dados GOS do SMC-Brasil. A validação se deu por meio de comparações dos dados obtidos na base de dados GOS com séries de elevação de maré meteorológica obtidas dos registros de marégrafos.

Os registros de marégrafos da Marinha do Brasil não tinham duração adequada para uma validação estatisticamente aceitável, de modo que não foram utilizados. Por isso apenas foram utilizados marégrafos provenientes da base de dados da UHSLC e a validação foi realizada para toda a costa da América Latina.

As séries de maré meteorológica foram obtidas como resultado da eliminação da maré astronômica dos registros dos marégrafos. Este procedimento foi realizado por meio da análise harmônica das séries de marégrafos.

Os resultados obtidos mostram uma correlação aceitável e concordância com os eventos de elevações máximas e mínimas. As comparações de quantil-quantil estão sempre perto da bissetriz, o que permite comprovar que a distribuição de elevações é muito semelhante, ainda que a dispersão possa ser importante.

Portanto, pode concluir-se que a base de dados GOS disponível no SMC-Brasil é adequada para reproduzir as características da maré meteorológica na costa brasileira.

#### 2.3.6. Caracterização de maré meteorológica na costa do Brasil

Uma vez validada a base de dados de maré meteorológica GOS, realizou-se uma caracterização da costa do Brasil. Para isso, em cada ponto foram calculadas as seguintes variáveis: 1) elevação máxima da maré meteorológica (nível histórico máximo), 2) elevações médias e desvios típicos e 3) elevações superadas em 50%, 10%, 5% e 1% dos casos.

A Figura 35 mostra a elevação máxima de MM ao longo da costa brasileira. O comportamento geral é de elevações mínimas no norte e no centro da costa enquanto que no sul são máximas. Os valores máximos no extremo sul da costa são maiores que 2 metros, no entanto, no norte e centro são menores que 0,5 metros.

A região sul do Brasil está exposta à influência de tempestades extratropicais. Segundo Parise *et al.* (2009), as observações meteorológicas sinóticas e registros de elevação do nível do mar mostram que os eventos com maior aumento na costa sul do país estão associados com ventos de SW, juntamente com orientação NE/SW da linha de costa e os efeitos de Coriolis. Machado *et al.* (2010), identificaram quatro padrões de situações sinóticas geradoras de eventos extremos de temporais no sul do Brasil. Os três primeiros são tempestades extratropicais (de baixa pressão), semelhantes aos de Parise *et al.* (2009), e o quarto padrão caracteriza-se por um anticiclone (alta pressão).

Os valores médios de elevação da MM (Figura 36), como esperado, estão muito próximos de zero, embora seja clara a tendência de valores negativos nas costas nordeste, norte e positivos no sul e sudeste. Os valores negativos do mapa representam a prevalência de altas pressões

atmosféricas. Já os valores positivos são a resposta das baixas pressões causadas pela passagem de tempestades extratropicais que vêm do Atlântico Sul e dos ventos Alísios na zona equatorial. O desvio padrão (Figura 37) dá uma medida da variabilidade espacial da maré meteorológica. A variabilidade na elevação da maré meteorológica no norte é muito baixa (menos de 15 centímetros), enquanto que no sul pode chegar a 40 centímetros.

Finalmente, na Figura 38 se vê a elevação superada em 50%, 5% e 1% do tempo, o que corresponde ao percentual de 50%, 95%, e 99%.

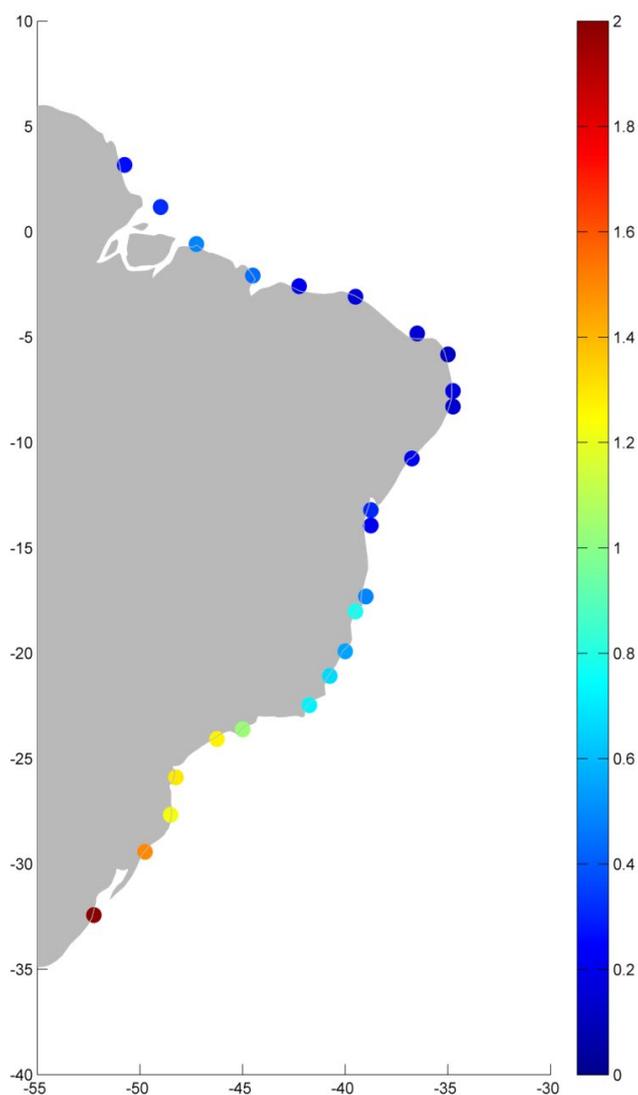


Figura 35: Elevação máxima da maré meteorológica obtida na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevação em metros.

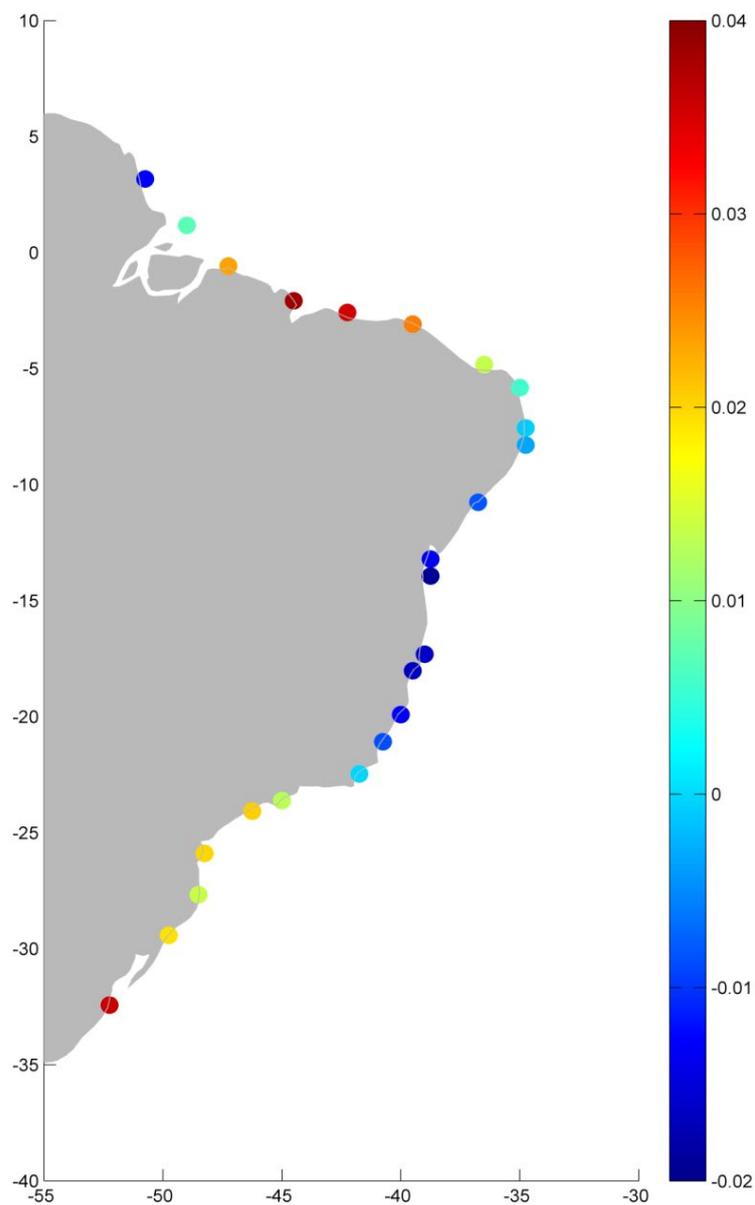


Figura 36: Elevação média da maré meteorológica obtida na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevação em metros.

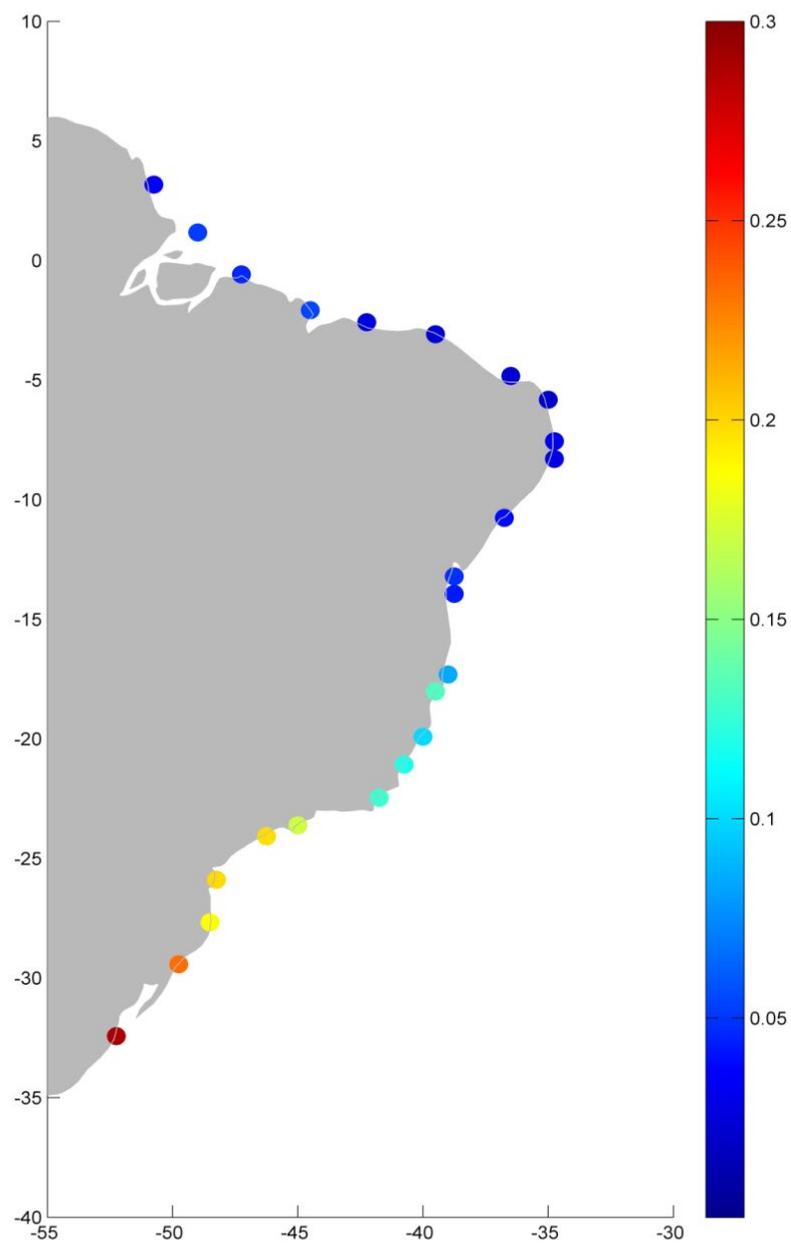


Figura 37: Desvio padrão da elevação da maré meteorológica obtida na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevação em metros.

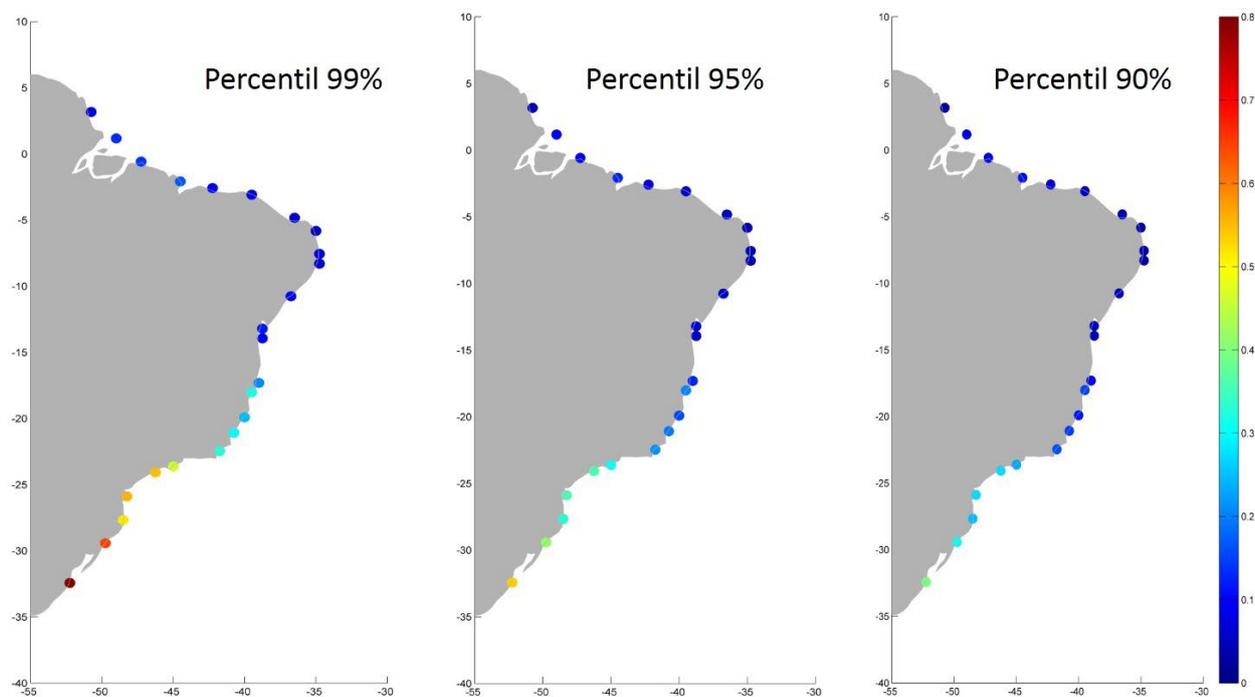


Figura 38: Elevações dos percentuais de 99%, 95%, e 90% da maré meteorológica, obtidas na base de dados GOS do SMC-Brasil. Elevações em metros.

### 2.3.7. Conclusões

Nesta seção (2.3) foram descritos os conceitos necessários para compreender a origem da elevação da maré meteorológica nos oceanos, particularmente em áreas próximas à costa, e foi explicado como é constituída a base de dados GOS de maré meteorológica incluída no SMC-Brasil.

Esta base de dados consiste em um conjunto de séries de maré meteorológica distribuídas ao longo da costa do Brasil. Cada uma destas séries foi obtida a partir da reanálise realizada no projeto “Efeitos das mudanças climáticas sobre a costa da América Latina e do Caribe (C3A)”.

A reanálise foi feita através do modelo numérico ROMS em modo barotrópico. A batimetria ETOPO2 foi usada para se obter uma malha de simulação de 0,25° de resolução. A simulação foi forçada com campos de vento globais a 10 m de altura e campos de pressão ao nível do mar provenientes do NCEP/NCAR.

A reanálise foi validada através de comparações com séries de marégrafos na costa do Brasil. Foram encontrados erros quadráticos médios da ordem de 10-15 centímetros e correlações de 0,6 a 0,7. Assim, a confiabilidade da base de dados foi comprovada.

Considerando as características e variabilidade da maré meteorológica, 24 pontos foram selecionados ao longo de toda a costa brasileira a serem incorporados na base de dados do SMC-Brasil.

Por fim, uma descrição espacial da base de dados foi realizada.

### 2.3.7.1. Limitações da base de dados

As forçantes utilizadas na simulação numérica têm uma resolução global que não inclui alguns eventos de dimensões regionais e locais que podem ocorrer na costa brasileira e suas proximidades e que podem ter efeitos sobre a elevação produzida pela maré meteorológica, como por exemplo, os furacões e as descargas fluviais.

A ausência de informações entre as forçantes condiciona os valores extremos das séries de maré meteorológica.

Os furacões, que têm em suas características as baixas pressões e ventos fortes, costumam produzir elevações significativas. No entanto, a resolução da reanálise NCEP/NCAR não é suficiente para reproduzir adequadamente estes fenômenos. A consequência é que, já que não se conta com forçantes adequadas, a reanálise de maré meteorológica do SMC-Brasil não possui a elevação produzida por esses fenômenos.

Em áreas com descargas provenientes de rios, a maré meteorológica é modificada devido ao nível do rio, as correntes de densidade, a interação com a batimetria, etc. Por isso, rios com descargas elevadas, como é o caso do rio Amazonas no norte do Brasil, devem ser considerados na simulação de maré meteorológica.

Os efeitos desses fenômenos serão considerados em reanálises posteriores, para as quais é necessário contar com reanálises atmosféricas de maior resolução e incluir batimetrias de detalhe, bem como as descargas de rios, como do Rio Amazonas.

# CAPÍTULO 3: NÍVEL DA MARÉ E COTA DE INUNDAÇÃO

## 3. Nível da Maré e Cota de Inundação

### 3.1. Introdução

A cota de inundação alcançada em uma praia em um dado momento pela ação da dinâmica marinha e meteorológica é um fenômeno particularmente complexo, tanto no número de elementos envolvidos no processo de inundação, como pela interação entre esses elementos.

Dentre os elementos de dinâmica marinha que influenciam na cota de inundação se encontram o nível de maré astronômica, o nível da maré meteorológica e o nível atingido pelas ondas quebrando na praia. Estes três elementos variam no espaço e no tempo e também interagem com a morfologia da praia e das proximidades.

Conhecer a cota de inundação em uma determinada praia e associá-la à uma probabilidade de ocorrência ou a um período de retorno em anos é uma condição indispensável no planejamento e projeto de obras ou atividades na zona costeira, tais como: o projeto de barragens de proteção, delimitação dos domínios público e privado, o desenvolvimento de protocolos de ação para casos de inundações ou na recuperação de ecossistemas costeiros protegidos.

Este capítulo detalha as metodologias implementadas no SMC-Brasil para se calcular a cota de inundação em uma determinada praia, levando-se em conta o nível de maré astronômica, o nível da maré meteorológica e a elevação de nível médio, como consequência da ação da onda no perfil de praia.

### 3.2. Nível de maré e cota de inundação

O fenômeno de inundação em uma praia pode ser representado de acordo com o esquema da Figura 39. Neste esquema, para um dado instante, observa-se um nível da maré composto pela maré astronômica (MA), a maré meteorológica (MM) e uma batimetria. Sobre tal nível de maré se encontra a onda que, em função de suas características e da batimetria da praia, se propaga até a costa. Ao chegar à costa, a onda quebra na praia, resultando em um movimento de subida da massa de água ao longo do perfil de praia (*runup* - RU). O RU é composto pelo empilhamento de água na costa devido à quebra de ondas (*wave setup*) e pelo espraiamento da onda na face da praia. O nível final alcançado, assim como a combinação desses elementos é chamado de cota de inundação (CI).

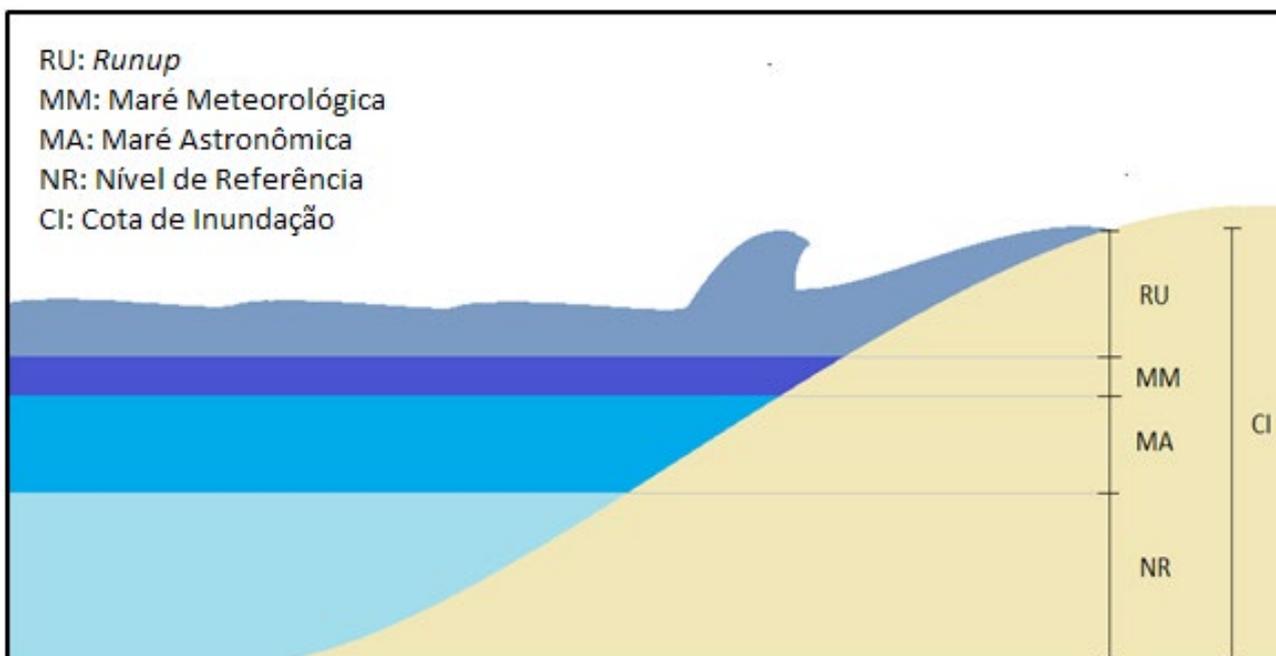


Figura 39: Fatores que afetam a cota de inundação.

Além da interação entre os elementos envolvidos (onda-batimetria-nível de maré-*runup*), o fenômeno da inundação apresenta a complicação adicional de que alguns dos fatores envolvidos na sua definição (ondas, vento, etc.) são variáveis aleatórias e, por conseguinte, a sua apresentação está sujeita a uma determinada probabilidade de ocorrência. Portanto, a determinação da cota de inundação é um problema estocástico de extremos. Uma das consequências disso é que não se pode estabelecer um “limite determinista da cota de inundação durante o pior momento”, mas deve ser associado a cada cota de inundação “a probabilidade de ser ultrapassado em um momento determinado”. Portanto, é necessário obter a função de distribuição da cota de inundação.

### 3.3. Metodologia de cálculo

As metodologias implementadas no SMC-Brasil para a realização dos cálculos de nível da maré e cota de inundação são descritas nesta seção.

#### 3.3.1. Bases de dados empregadas

##### 3.3.1.1. Batimetrias

Utiliza-se a base de dados de batimetrias incorporada no SMC-Brasil. Esta base de dados é composta por informações das cartas náuticas da costa brasileira obtidas junto a Marinha do Brasil. A informação batimétrica desta base de dados também pode ser melhorada através da incorporação de batimetrias detalhadas, usando as ferramentas do SMC-Brasil.

##### 3.3.1.2. Maré astronômica

Utiliza-se a base de dados de maré astronômica GOT incluída no SMC-Brasil. As características específicas desta base de dados estão descritas no segundo capítulo do presente documento (seção 2.2).

### 3.3.1.3. Maré meteorológica

Utiliza-se a base de dados de maré meteorológica GOS incluída no SMC-Brasil. As características específicas desta base de dados se encontram descritas no segundo capítulo deste documento (seção 2.3).

### 3.3.1.4. Ondas

Utiliza-se a base de dados de ondas DOW incluída no SMC-Brasil. As características específicas desta base de dados se encontram descritas no “Documento Temático de Ondas” (IH CANTABRIA – MMA, 2017).

## 3.3.2. Procedimento de cálculo

A cota de inundação num instante  $t$  é definida como:

$$CI(t) = MA(t) + MM(t) + Ru(t) \quad (20)$$

Onde  $MA$  é a série de maré astronômica,  $MM$  é a série de maré meteorológica e  $Ru$  é o *runup* produzido pela onda ao quebrar na praia.

Existem diversas formulações para a estimativa de *runup* em praias, como por exemplo as propostas por Hunt (1959), Holman e Sallenger (1985), Guza e Thornton (1982), Holman (1986), Mase (1989), Nielsen e Hanslow (1991), Douglas (1992), Ahrens e Seelig (1996), Ruessink *et al.*, (1998), Ruggiero *et al.*, (2004), Stockdon *et al.*, (2006), Roberts *et al.*, (2010), Vousdoukas *et al.*, (2012), Guza e Feddersen (2012). Todas estas formulações se baseiam nas condições hidrodinâmicas das ondas (altura, comprimento de onda e período de pico) e um parâmetro morfológico (declividade da praia), porém não existe consenso sobre qual é a mais adequada.

Uma das mais usadas é a proposta de Nielsen e Hanslow (1991) que distingue as praias entre refletivas e dissipativas. Os autores assumem uma distribuição de Rayleigh de tal forma que é possível obter diferentes *runups* representativos, como o *runup* significativo ( $R_s$ ), o *runup* superado em 2% dos casos ( $R_{2\%}$ ) e o *runup* médio ( $R_m$ ) segundo as formulações seguintes:

$$R_s = z; \quad (21)$$

$$R_{2\%} = 1,98z; \quad (22)$$

$$R_m = 0,98z; \quad (23)$$

Onde:

$$z = \begin{cases} 0,47(H_b L_0)^{0,5} \tan\beta & \text{se } \tan\beta > 0,1 \\ 0,04(H_b L_0)^{0,5} & \text{se } \tan\beta < 0,1 \end{cases}$$

Onde:

$H_b$  = Altura significativa de onda na quebra (m).

$L_0$  = Comprimento de onda em profundidades indefinidas (m).

$\tan \beta$  = Declividade da praia.

O *runup* utilizado no SMC – Brasil para o cálculo da cota de inundação corresponde ao superado em 2% dos casos ( $R_{2\%}$ ).

Portanto, para um ponto de praia determinado, uma vez que estas equações são resolvidas usando-se as séries completas de níveis e de onda incluídos no SMC-Brasil e a série de ondas se propaga até a quebra utilizando as metodologias disponíveis no *software*, se pode obter uma série de 60 anos, com valores da cota de inundação a cada hora para a determinada praia.

A partir desta série pode-se obter o regime médio e extremo para um ponto de uma praia. A metodologia utilizada para se determinar o regime extremo a partir da série temporal da cota de inundação é descrito em detalhes no Anexo 2.

### 3.3.3. Implementação no SMC-Brasil e exemplo dos resultados obtidos

A metodologia descrita na seção anterior encontra-se implementada no SMC-Brasil, de tal forma que se pode obter a cota de inundação em qualquer ponto da costa brasileira, seguindo alguns passos simples, descritos abaixo.

Para uma praia de interesse no litoral brasileiro, determina-se o ponto de onda DOW (ponto A na Figura 40), a partir do qual as ondas se propagam até a costa.

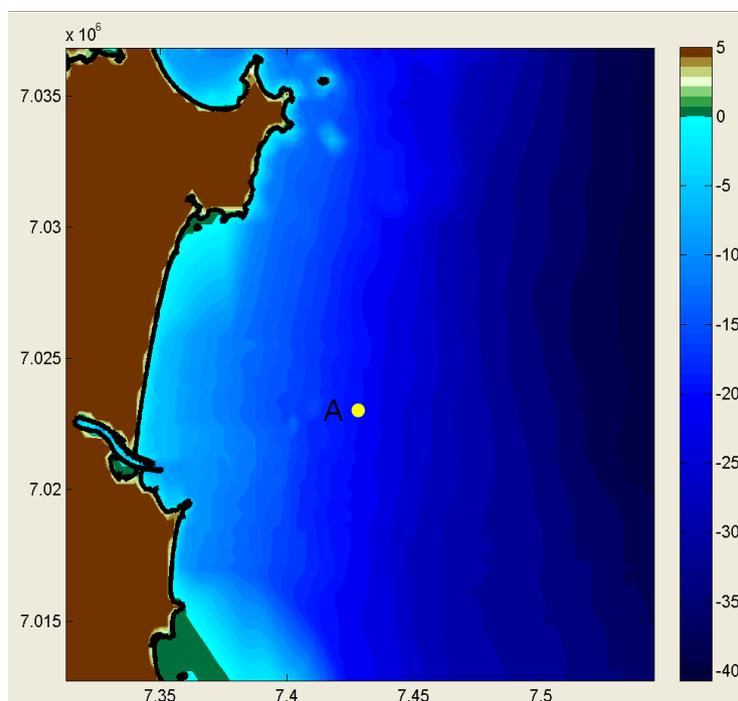


Figura 40: Exemplo de área de trabalho. Indica-se a posição do ponto de onda DOW utilizado para propagar a onda à costa.

No ponto A existe uma série de estados de mar DOW e uma série de maré astronômica GOT e maré meteorológica GOS associadas de tal forma que para este ponto pode-se analisar qualquer uma dessas variáveis. No caso deste exemplo, a Figura 41 mostra histogramas de elevação de maré meteorológica e astronômica no ponto A.

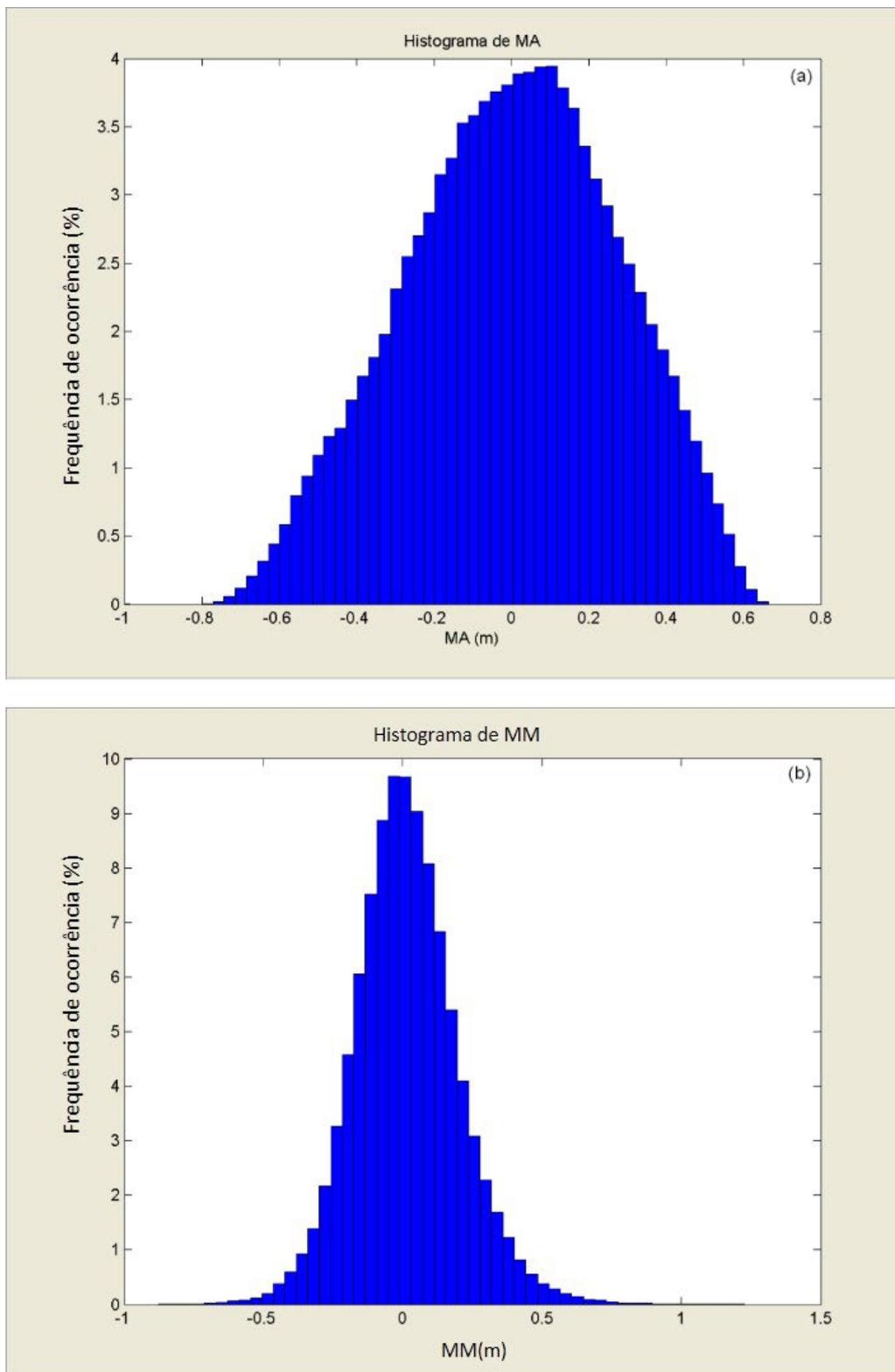


Figura 41: (a) Histograma de maré astronômica e (b) maré meteorológica associadas ao ponto A.

A partir da série DOW, aplicando a metodologia de propagação da onda, a onda é levada até a costa, de modo que é possível selecionar uma série de pontos ou perfis onde a série de estados de onda do mar é reconstruída. No caso da cota de inundação, esse cálculo está associado aos perfis, já que para determinar o *runup* é necessário saber a altura da onda na quebra. A Figura 42 mostra o desenho dos perfis na zona de interesse. Os perfis devem ser perpendiculares à costa e, associado a cada perfil, se deve indicar o tamanho de sedimento médio em milímetros, a densidade do sedimento e a declividade.

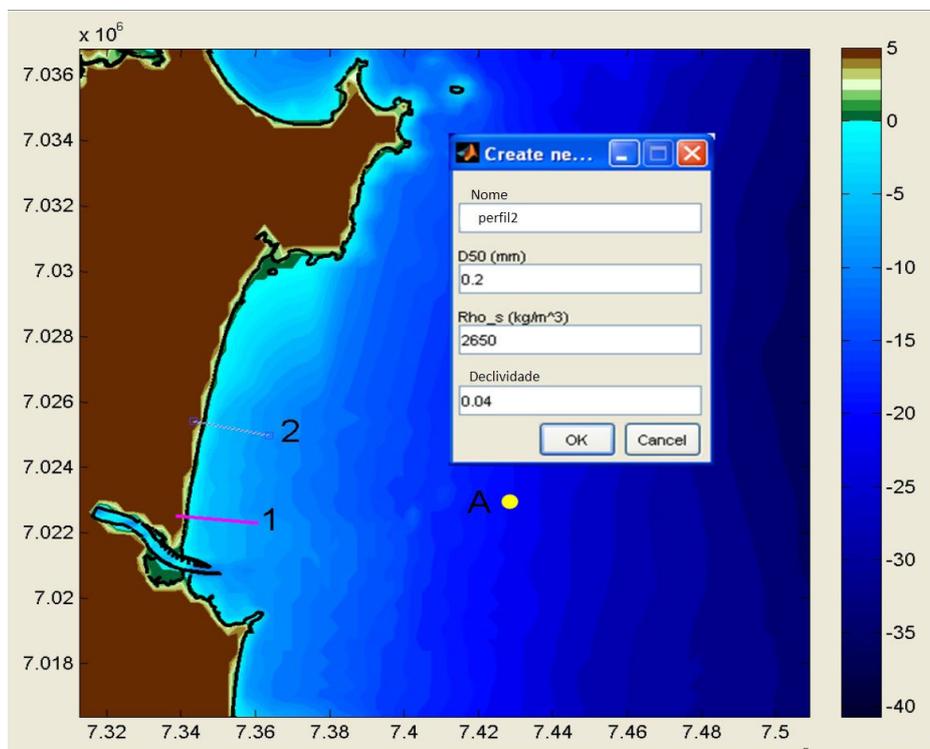


Figura 42: Exemplo de desenho de perfis na área de trabalho. Mostra-se em particular o local em que as propriedades do perfil 2 são indicados: Tamanho médio de sedimento, densidade e declividade do perfil.

Através das metodologias incorporadas no SMC-Brasil, é possível propagar a série DOW até a costa e determinar a posição sobre o perfil, de cada um dos estados de mar, onde a quebra da onda ocorre.

No SMC-Brasil se encontram implementados dois critérios para determinar qual é o ponto do início da quebra das ondas: o critério da velocidade máxima e o critério do percentual de ondas quebradas. No "Documento Temático de Ondas" (IH CANTABRIA – MMA, 2017) é encontrado detalhes de como se definem esses critérios.

A posição mais comum da quebra em cada perfil é indicado por círculos sobre o perfil. Quanto mais escuro o círculo, maior é a frequência de quebra nessa posição. A Figura 43 mostra os dois perfis selecionados e quais são as posições mais frequentes de quebra da onda sobre o perfil.

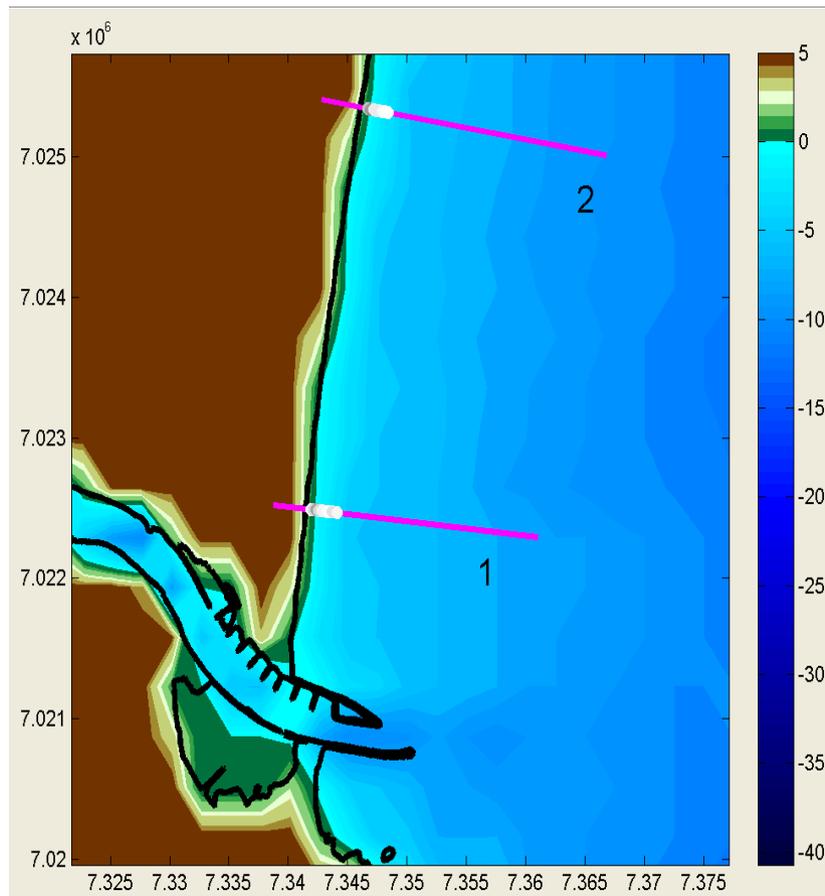


Figura 43: Perfis da área de trabalho indicando a posição e frequência de quebra. Os círculos em tons escuros indicam as maiores frequências.

Usando as alturas de onda em quebra e as características definidas para os perfis determina-se o *runup* para cada estado de mar, de modo que uma série temporal de altura das ondas na quebra é obtida. Desta série se pode obter uma série de resultados através da ferramenta estatística do SMC-Brasil. A Figura 44 mostra como um exemplo, o histograma e o regime extremo de *runup* do perfil 2.

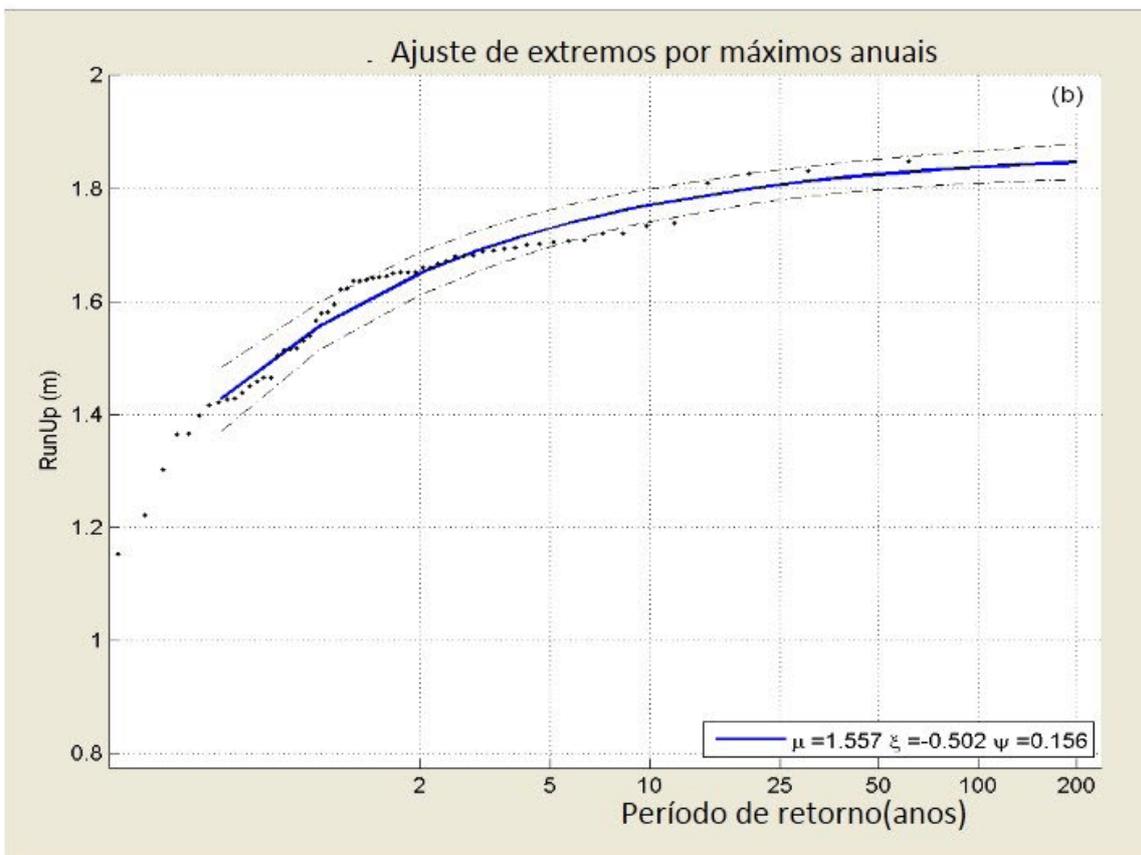
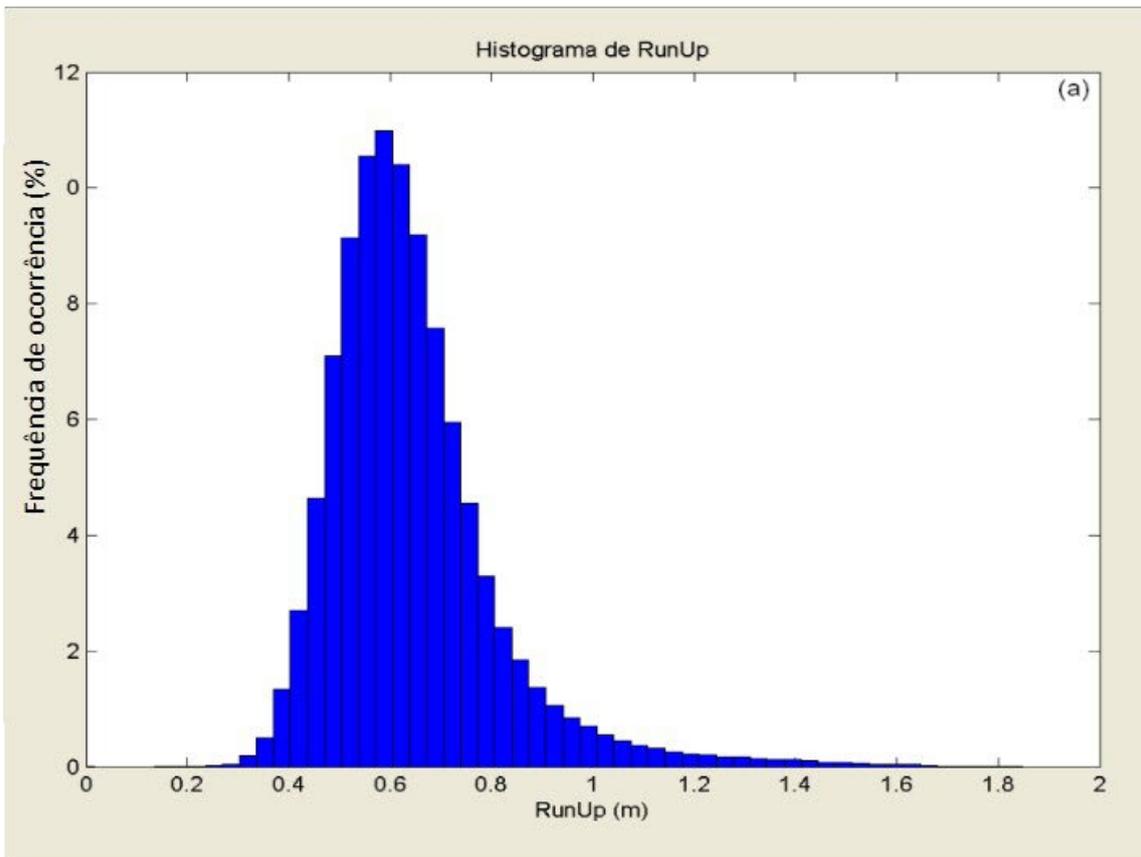


Figura 44: (a) Histograma de ocorrência de *runup* e (b) regime extremo de *runup* para o perfil 2.

Após a obtenção desses resultados, pode-se calcular a série da cota de inundação associada a cada perfil a partir de um conjunto de resultados estatísticos, tais como histogramas, regimes médios, regimes extremos, etc. A Figura 45 mostra como exemplo uma seção da série temporal, o histograma de freqüências e os regimes médio e extremo da cota de inundação.

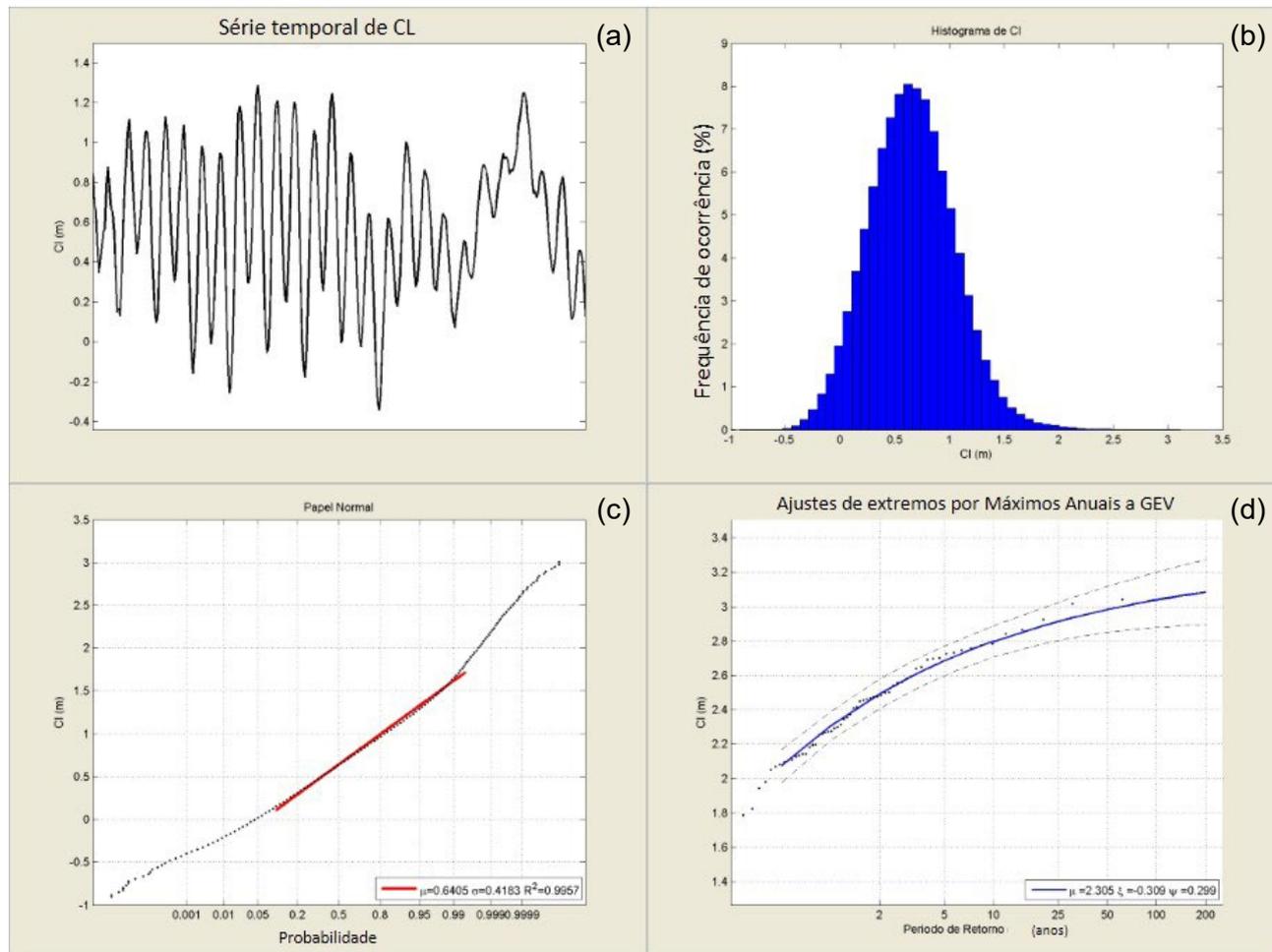


Figura 45: Exemplo de resultados estatísticos de cota de inundação obtidos pelo SMC-Brasil. (a) Seção da série temporal, (b) Histograma de ocorrência, (c) Regime médio e (d) Regime extremo.

Este procedimento se encontra totalmente implementado no SMC-Brasil, portanto seguindo alguns passos simples é possível conhecer a cota de inundação associada a um período de retorno para uma determinada praia.

Uma vez conhecidas as cotas de inundação e os períodos de retorno em cada perfil, pode-se projetar as elevações e o terreno, bem como determinar contornos de inundação com diferentes períodos de retorno. A Figura 46 mostra um exemplo esquemático do procedimento, em que os contornos de inundação associados a períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos são apresentados.

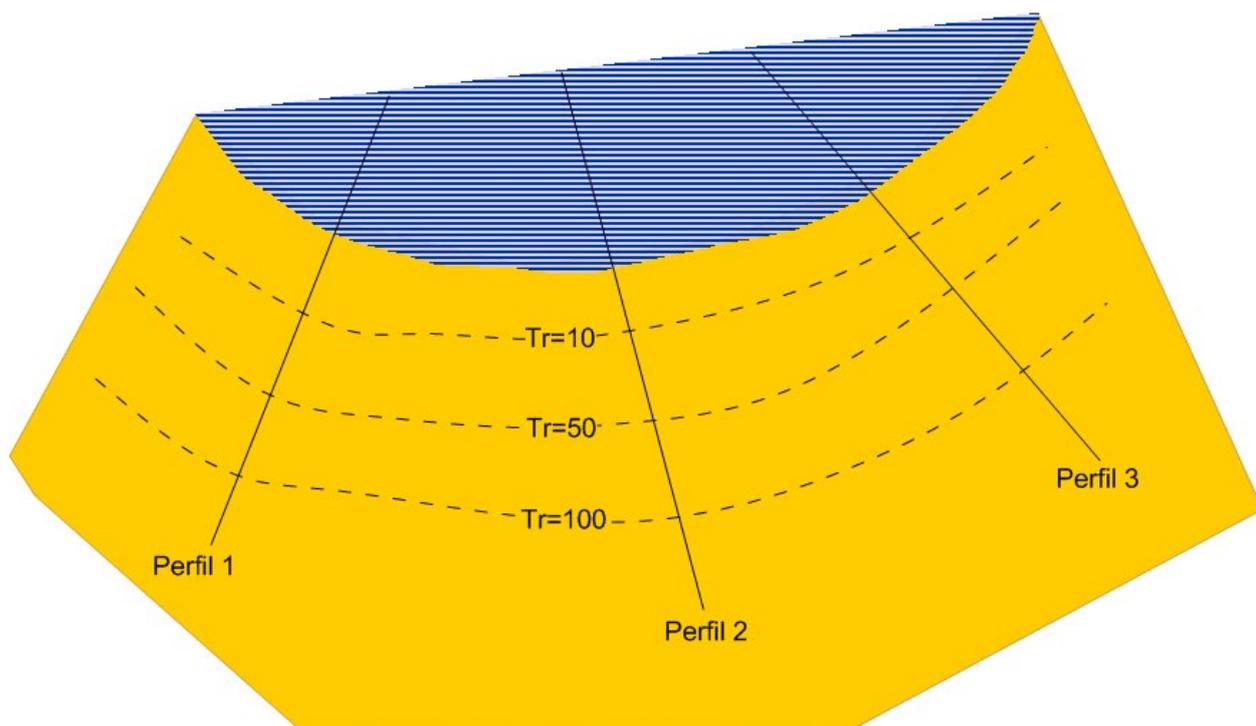


Figura 46: Esquema representativo da determinação de contornos de inundação para diferentes períodos de retorno a partir dos regimes extremos de cota de inundação associados a perfis.

### 3.4. Diferença entre a cota de inundação obtida no SMC-Brasil e as encontradas no documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017)

Esta seção refere-se às principais diferenças entre os resultados de cota de inundação obtidos através das bases de dados e metodologias implementadas no SMC-Brasil e os resultados obtidos no documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017).

Em ambos os casos, os resultados permitem relacionar os níveis de inundação em um ponto da costa, com probabilidade e períodos de retorno. Do mesmo modo, a fonte de dados utilizada nos cálculos é a mesma. No entanto, existem diferenças metodológicas importantes que fazem com que a aplicação de cada um deles seja mais apropriada, dependendo das circunstâncias.

A principal diferença entre os dois métodos é o tipo de aproximação e, por conseguinte, a utilização dos resultados tem fins distintos. Embora os resultados do documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017) permitam ter uma ideia de possíveis inundações em uma região da costa de forma global, os resultados do SMC-Brasil assim como o cálculo das dinâmicas à beira mar permitem estimar mais precisamente a cota de inundação em nível local.

Entre as duas metodologias existem várias diferenças que são resumidas no Quadro 4. No entanto, as diferenças mais importantes são: 1) o uso das características específicas da praia e 2) o método de propagação da onda.

**Quadro 4:** Diferenças na metodologia empregada para o cálculo da cota de inundação entre o SMC-Brasil e o documento “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil” (MMA, 2017).

		Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil		SMC-Brasil
Elementos		Geral		Particular
Geral	Cálculo		Geral	
	Alcance espacial		Por regiões costeiras	Para uma praia específica
	Maré Astronômica		Série 60 anos GOT	Série 60 anos GOT
	Maré Meteorológica		Série 60 anos GOS	Série 60 anos GOS
Níveis	Base de dados		Série 60 anos DOW	Série 60 anos DOW
	Propagação até a costa		Lei de Snell: Batimetria reta e paralela em dois trechos do perfil	Modelo numérico OLUCA-SP
	Casos a propagar		Todos um a um	Seleção de casos representativos
	Critério de quebra		Definido como: Profundidade de quebra igual a 0,8 da altura de onda	Modelos do OLUCA: Dissipação associada à propagação de bores (vagalhões): Battjes e Janssen (1978) Thornton e Guza (1983) Variação espacial da energia das ondas ou de “ação de onda” Rattanapitikon e Shibayama (1998)
Onda	Runup		Formulação de Nielsen e Hanslow (1991)	Formulação de Nielsen e Hanslow (1991)
	Batimetria		Cartas náuticas	Cartas náuticas + batimetria de detalhe
	Declividade da praia		Típica de praias refletiva e dissipativa da zona	Específica da praia
	Orientação da praia		Típica das praias da zona	Específica da praia
Praia				

No que diz respeito às características específicas da praia, no documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017) foram utilizadas cartas náuticas de onde se aproximou uma batimetria reta e paralela em dois trechos do perfil, utilizando as diretrizes de praia típica da zona. Também foram usadas declividades de praias típicas para condições refletivas e dissipativas. Nos cálculos realizados no SMC-Brasil se utiliza uma batimetria real, obtida a partir de cartas náuticas e batimetrias detalhadas (que o usuário insere na análise), obtendo-se a orientação real da praia, utilizando as declividades específicas da praia.

No caso da propagação da onda, no documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017) foi utilizada a lei de Snell, onde se aplicou um esquema simples para encontrar a altura de quebra, enquanto que no SMC-Brasil são realizadas propagações de onda, pelo modelo parabólico de propagação de onda OLUCA-SP, até a costa e a obtenção da quebra das ondas é realizada mediante alguns dos critérios implementados e descritos no “Documento Temático de Ondas” (IH CANTABRIA -

MMA, 2017). Neste documento se pode encontrar uma descrição detalhada do modelo de propagação de ondas e critérios de quebra implementados.

Os resultados do documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017) permitem conhecer em linhas gerais como é a inundação em uma zona da costa brasileira, além de fornecer orientações para um projeto preliminar de ações. Entretanto para se definir as características específicas de uma obra, ou seja, um plano de ações na costa que exige maior precisão na estimativa do nível de inundação, é necessário considerar no cálculo as características particulares da praia. Por estas razões deve-se recorrer ao cálculo realizado pelo SMC-Brasil, realizado com a metodologia descrita neste capítulo.

### 3.5. Conclusões

Neste capítulo se descreve o que é a cota de inundação, além de quais são seus elementos de influência.

Explicou-se a metodologia de cálculo utilizada no SMC-Brasil para se calcular a cota de inundação na praia. Posteriormente, foi descrito o procedimento para realizar este cálculo usando as ferramentas implementadas no SMC-Brasil.

Finalmente foram discutidas as diferenças metodológicas entre os cálculos da cota de inundação feitos através do SMC-Brasil e os encontrados no documento “Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil” (MMA, 2017).

# REFERÊNCIAS

AHRENS, J.P.; SEELING, W.N. Wave runup on beaches. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING - ICCE, 25., 1996. **Proceedings...** 1996. v.1 p.981-993.

ARDALAN, A.A.; HASHEMI-FARAHANI, H. A harmonic approach to global ocean tide analysis based on TOPEX/Poseidon satellite. **Marine Geophysical Researches**, v.28, n.3, p.235-255, 2007.

BATTJES, J.A. E JANSSEN, J.P.F.M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: International Conference of Coastal Engineering, 16., 1978, Houston. **Proceedings...** 1978, p.569-589.

BUDGEELL, W.P. Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region. **Ocean Dynamics**, 2005. DOI: 10.1007/s10236-005-0008-3.

DI LORENZO, E. Seasonal dynamics of the surface circulation in the southern California Current System. **Deep-Sea Research, Part II**, v.50, p.2371-2388, 2003.

DINNIMAN, M.S.; KLINCK, J.M.; SMITH JR., W.O. Cross shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry. **Deep-Sea Research, Part II**, v.50, p.3103-3120, 2003.

DOUGLAS, S. Estimating extreme values of run-up on beaches. **Journal of Waterways, Harbours and Ocean Engineering**, v.118, n.2, p.220-224, 1992.

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

EGBERT, G.D.; EROFEEVA, S.Y. Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.19, p.193-204, 2002.

FOREMAN, M.G.G. **Manual for tidal heights analysis and prediction**. Pacific Marine Science, Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C.1977

GUZA, R.T.; THORNTON, E.B. Swash oscillations on a natural beach. **Journal of Geophysical Research – Oceans and Atmospheres**, v.87, n.NC1, p.483-491, 1982.

GUZA, R.T.; FEDDERSEN, F. Effect of wave frequency and directional spread on shoreline runup. **Geophysical Research Letters**, v.39:L11607, 2012.

HAIDVOGEL, D.B.; ARANGO, H.G.; HEDSTROM, K.; BECKMANN, A.; MALANOTTE-RIZZOLI, P.; SHCHEPETKIN, A.F. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v.32, p.239-281, 2000.

HOLMAN, R.A. Extreme values statistics for wave run-up on a natural beach. **Coastal Engineering**, v.9, p.527-544, 1986.

HOLMAN, R.A.; SALLENGER, A.H. Setup and swash on a natural beach. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.945-953, 1985.

HUNT, I.A. Design of seawalls and breakwaters. **Journal of Waterways and Harbours Division**, v.85, p.123-152, 1959.

IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Documento Temático – Ondas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017.

LEADBETTER, M.R.; LINDGREN, G.; ROOTZÉN, H. **Extremes and related properties of random sequences and processes**. Berlin: Springer, 1983. 336p.

MACHADO, A.A.; CALLIARI, L.J.; MELO, E.; KLEIN, A.H.F. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v.5, n.2, p.277-286, 2010.

MARCHESIELLO, P.; MCWILLIAMS, J.C.; SHCHEPETKIN, Y A. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. **Journal of Physical Oceanography**, v.33, p.753-783, 2003.

MASE, H. Random wave runup height on gentle slope. **Journal of Waterways, Harbours and Ocean Engineering**, v.5, n.5, p.649–661, 1989.

MÉNDEZ, F.J.; MENÉNDEZ, M.; LUCEÑO, A.; LOSADA, I.J. Analyzing Monthly Extreme Sea Levels with a Time-Dependent GEV Model. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.24, p.894-911, 2007.

MMA. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MMA. Diálogos Brasil – Espanha: Sistema de Modelagem Costeira. **Resumo Executivo**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL-ESPANHA: A EXPERIÊNCIA ESPANHOLA E A APLICAÇÃO DO SMC BRASIL NO APOIO À GESTÃO DA COSTA BRASILEIRA,2. Brasília: IABS, 2013. 69p.

MMA. **Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017.

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

PARISE, C.K.; CALLIARI, L.J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v.57, n.3, p.175-188, 2009.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. **Computers and Geosciences**, v.28, p.929-937, 2002.

PELIZ, A.; DUBERT, J.; HAIDVOGEL, D.B.; LE CANN, B. Generation and unstable evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n.C8, 2003. DOI: 10.1029/2002JC001443.

PUGH, D.T. **Changing sea levels: Effects of tides, weather and climate**. Cambridge University Press, 2004. 280p.

RATTANAPITIKON, W.; SHIBAYAMA, T. Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves. **Coastal Engineering**, v 40, n.4, p. 327–346, 1998.

ROBERTS, T.M.; WANG, P.; KRAUS, N.C. Limits of wave runup and corresponding beach-profile change from large-scale laboratory data. **Journal of Coastal Research**, v.26, n.1, p.184–198, 2010.

RUSSINK, B.G.; KLEIMHANS, M.G.; VAN DEL BEUKEL, P.G.L. Observations of swash under highly dissipative conditions. **Journal of Geophysical Research**, v.103, n.2, p.3111–3118, 1998.

RUGGIERO, P.; HOLMAN, R.A.; BEACH, R.A. Wave run-up on a high-energy dissipative beach. **Journal of Geophysical Research**, v.109, p.407–419, 2004.

STOCKDON, H.F.; HOLMAN, R.A.; HOWD, P.A.; SALLENGER JR, A.H. Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering*, 53:573–588. (2006).

THORNTON, E.B., GUZA, R. T. Transformation of wave height distribution. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, p. 5925-5983, 1983.

VOUSDOUKAS, M.I.; WZIASTEK, D.; ALMEIDA, L.P. Coastal vulnerability assessment based on video wave run-up observations at a mesotidal, steep-sloped beach. **Ocean Dynamics**, v.62, n.1, p.123–137, 2012.

WARNER, J.C.; SHERWOOD, C.R.; ARANGO, H.G.; SIGNELL, R.P. Performance of four Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic length Scale Method. **Ocean Modelling**, v.8, p.81-113, 2005a.

WARNER, J.C.; GREYER, W.R.; LERCZAK, J.A. Numerical Modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. **Journal of geophysical Research**, v.110, C05001, 2005b. DOI: 10.1029/2004JC002691.

WILKIN, J.L.; ARANGO, H.G.; HAIDVOGEL, D.B.; LICHTENWALNER, C.S.; DURSKEI, S.M.; HEDSTROM, K.S. A regional Ocean Modeling System for the Long-term Ecosystem Observatory. **Journal of Geophysical Research**, v.110, C06S91, 2005. DOI:10.1029/2003JC002218.

**ANEXOS**

## Anexo 1

### VALIDAÇÃO DA BASE DE DADOS DA MARÉ ASTRONÔMICA

## 1. Validação da Base de Dados da Maré Astronômica

### 1.1. Introdução

O Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), que está sendo desenvolvido pelo IH Cantabria, requer diversas séries de dados de variáveis ambientais, que são representativas das condições locais da área de estudo e permitem a modelagem de fenômenos costeiros de interesse.

De forma concreta, o SMC-Brasil inclui bases de dados de ondas e níveis ao longo de toda a costa para o período de tempo compreendido entre 1948 e 2008. Essas bases de dados têm sido geradas por reanálise, necessitando, assim, ser validadas mediante dados medidos *in situ*.

Este documento descreve a metodologia e os resultados da validação da base de dados de níveis de marés astronômicas incluídas no SMC-Brasil.

Os dados de maré astronômicas incluídos no SMC-Brasil são provenientes da base de dados TOPEX, que proporciona as características das principais harmônicas da maré astronômica em uma malha-grade global com uma resolução de 0,25°. Para a base de dados de maré astronômica do SMC-Brasil selecionou-se uma série de nós do TOPEX próximos da costa, onde se geraram as séries de dados de nível de maré astronômica entre 1948 e 2008.

Para se realizar a validação, uma série de dados maregráficos dispostos ao longo da costa do Brasil estão disponíveis. Estes dados foram fornecidos pela Marinha do Brasil/DHN, os quais possibilitam a validação, comparando-se estatisticamente cada série de mareógrafo com a série de dados de maré astronômica do ponto mais próximo à base de dados do SMC-Brasil.

### 1.2. Objetivo

O objetivo deste estudo é a validação dos dados de maré astronômica incluídos no SMC-Brasil, mediante sua comparação com os dados medidos por mareógrafos. Esta validação é realizada de forma diferenciada em cada um dos mareógrafos, comparando-os com a série de dados correspondente ao ponto de reanálise mais próximo de cada um deles.

Para se alcançar este objetivo é necessário levar em conta a localização dos mareógrafos assim como sua distância até o ponto de reanálise a ser validado.

### 1.3. Dados disponíveis

#### 1.3.1. Base de dados de níveis de maré astronômica, SMC-Brasil

Os dados de maré astronômica foram gerados pelo IH Cantabria ao longo da costa do Brasil, utilizando-se as constantes harmônicas procedentes do modelo global de marés TPXO (versão 7), desenvolvido pela Universidade do Estado de Oregon (EGBERT *et al*, 1994; EGBERT; EROFEEVA,

2002). O modelo TPXO assimila dados das missões TOPEX/Poseidon e de marégrafos (ARDALAN; HASHEMI-FARAHANI, 2007). Este modelo representa um melhor ajuste (em termos de mínimos quadrados) da equação de marés de Laplace aos dados de satélite resultantes da missão TOPEX/Poseidon. Atualmente, o modelo TPXO é um dos modelos globais de maré mais precisos.

A base de dados TPXO, resultante do modelo, oferece quatro componentes harmônicas semi-diurnas ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ), quatro componentes diurnas ( $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ) e duas de longo período ( $M_m$  e  $M_f$ ). Os dados são fornecidos em uma grade com cobertura global de 1440 x 721 pontos e com 0,25° de resolução espacial, tanto em latitude quanto em longitude. A base de dados TPXO, bem como uma descrição mais detalhada do modelo numérico pode ser encontrada no seguinte endereço eletrônico: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>. A Figura 47 mostra um mapa da componente  $M_2$  calculada com o modelo apresentado.

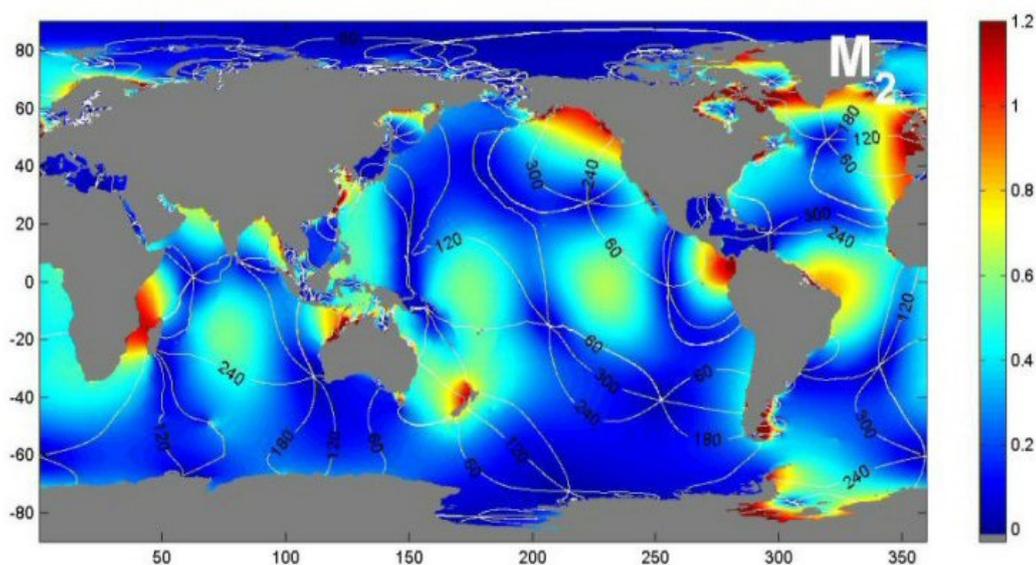


Figura 47: Mapa da componente de maré  $M_2$  calculada com o modelo TPXO.

Fonte: <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>

A base de dados descrita previamente foi utilizada para calcular a maré astronômica na costa do Brasil. Concretamente, calculou-se a maré astronômica nos pontos ao longo da costa, como mostra a Figura 48.



Figura 48: Localização dos pontos de dados de maré astronômica incluídos no SMC-Brasil.

Para cada ponto da costa do Brasil (ver Figura 48) componentes harmônicas foram extraídas das base de dados TPXO. Com estas componentes harmônicas calculou-se para cada ponto a maré

astronômica no período 1948-2008, com resolução temporal horária. Para se obter a variação da modulação nodal da maré astronômica, a previsão foi feita ano após ano.

Para se calcular a maré astronômica, foram utilizadas as ferramentas de processamento de dados desenvolvidas pela instituição francesa *Institut de Recherche pour le Développement* (<http://roms.mpl.ird.fr/>) e o modelo de análise harmônica *t\_tide* (PAULOWICZ *et al.*, 2002), amplamente utilizado na comunidade científica.

Os resultados obtidos para a costa do Brasil são: série horária de maré astronômica no período 1948-2008 em cada um dos pontos mostrados na Figura 48.

### 1.3.2. Marégrafos

Foram disponibilizadas as séries de dados de níveis medidas por 33 marégrafos dispostos ao longo da costa do Brasil. A localização exata de cada um deles é mostrada na Figura 49.

O Quadro 5 mostra um resumo das características das séries de dados disponíveis. Para cada marégrafo é apresentado:

- Sua latitude e longitude;
- A data de início e fim da série de dados;
- O período de tempo em que os dados estão disponíveis (em meses);
- As características do ponto onde o marégrafo está localizado.

Três tipos de localização se distinguem:

- Mar aberto: Marégrafos localizados em ilhas distantes da costa;
- Costa: Marégrafos localizados na costa do Brasil em pequenas baías ou foz dos rios;
- Estuário: Marégrafos localizados dentro de grandes estuários onde a onda de maré requer várias horas para se propagar da costa até o ponto onde o marégrafo se encontra.

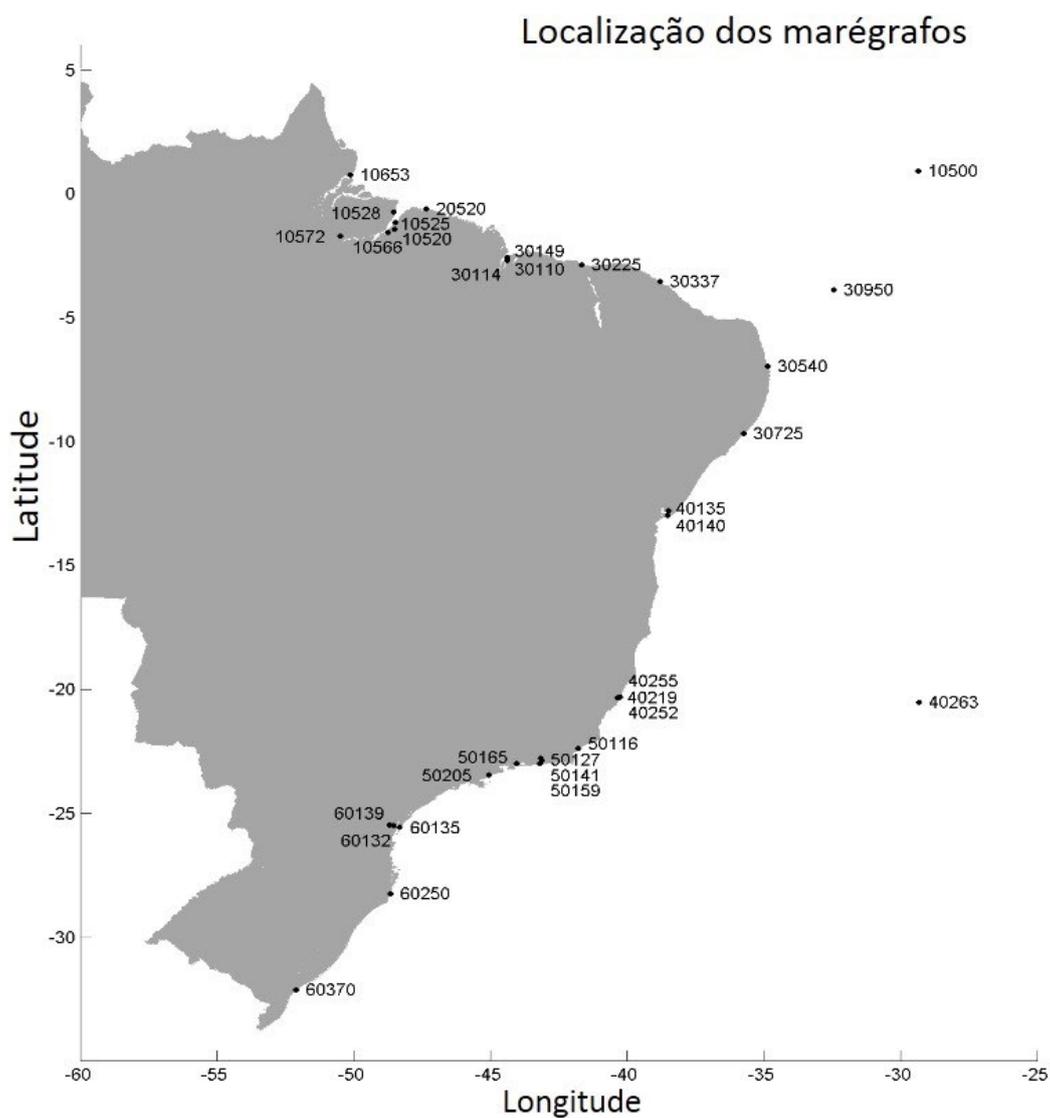


Figura 49: Localização de marégrafos ao longo da costa do Brasil.

Quadro 5: Características das séries de dados dos marégrafos.

Nº Marégrafo	Latitude	Longitude	Data Início	Data Fim	Período de dados	Localização
10500	00° 55".2 N	029° 20".6 O	18/01/1993	22/03/1994	14	Mar aberto
10520	01° 26".2 S	048° 29".6 O	02/03/1955	20/02/1956	12	Estuário
10525	01° 09".9 S	048° 28".5 O	13/11/2010	21/01/2011	2	Estuário
10528	00° 44".0 S	048° 31".0 O	19/11/2010	22/01/2011	2	Estuário
10566	01° 32".4 S	048° 45".2 O	01/07/2010	30/06/2011	12	Estuário
10572	01° 41".5 S	050° 29".0 O	08/07/1977	28/02/1978	8	Estuário
10653	00° 45".7 N	050° 07".1 O	03/06/2008	03/11/2008	5	Estuário
20520	00° 37".0 S	047° 21".0 O	01/01/1955	30/12/1955	12	Costa
30110	02° 34".6 S	044° 22".2 O	01/01/1985	31/03/1985	3	Estuário
30114	02° 40".7 S	044° 21".8 O	06/07/1984	30/09/1984	3	Estuário
30149	02° 33".9 S	044° 22".7 O	01/08/1991	31/07/1993	24	Estuário
30225	02° 51".1 S	041° 38".7 O	04/02/1984	03/02/1985	12	Costa
30337	03° 32".1 S	038° 47".9 O	27/07/2000	28/08/2000	1	Costa
30540	06° 58".2 S	034° 50".4 O	18/01/1981	19/01/1982	12	Costa
30725	09° 41".0 S	035° 43".5 O	13/04/2006	13/04/2007	12	Costa
30950	03° 52".3 S	032° 25".5 O	01/01/1972	31/12/1972	12	Mar aberto
40135	12° 47".8 S	038° 29".5 O	03/09/2003	03/12/2003	3	Costa
40140	12° 57".9 S	038° 31".0 O	02/01/1960	22/12/1960	12	Costa
40219	20° 19".3 S	040° 20".1 O	15/08/2003	28/10/2003	2	Costa
40252	20° 19".1 S	040° 17".8 O	04/12/2008	04/06/2009	6	Costa
40255	20° 17".3 S	040° 14".6 O	21/07/1991	12/09/1991	2	Costa
40263	20° 30".5 S	029° 18".6 O	01/01/1975	31/12/1975	12	Mar aberto
50116	22° 23".1 S	041° 46".2 O	01/01/1996	31/12/1996	12	Costa
50127	22° 46".7 S	043° 09".5 O	19/03/2008	19/03/2009	12	Costa
50141	22° 53".0 S	043° 08".1 O	01/09/2003	31/08/2005	24	Costa
50159	22° 59".1 S	043° 11".3 O	13/03/2008	13/04/2008	1	Costa
50165	23° 00".0 S	044° 01".9 O	01/01/1980	31/12/1981	24	Costa
50205	23° 27".1 S	045° 02".8 O	01/01/1992	31/12/1992	12	Costa
60132	25° 30".1 S	048° 31".5 O	01/01/1997	31/12/1997	12	Costa
60135	25° 34".0 S	048° 19".0 O	01/01/1997	31/12/1997	12	Costa
60139	25° 27".3 S	048° 40".7 O	19/09/2000	19/11/2000	2	Costa
60250	28° 13".8 S	048° 39".0 O	01/01/1957	31/12/1957	12	Costa
60370	32° 07".4 S	052° 06".2 O	02/10/1959	21/09/1960	12	Costa

## 1.4. Metodologia de validação

Os dados de nível medidos por marégrafos são representativos das variações produzidas no nível do mar durante o período de coleta de dados. Estas variações de nível devem-se tanto a maré astronômica como a maré meteorológica incidentes em cada ponto da costa do Brasil.

O objetivo deste estudo é validar a componente obtida da maré astronômica, que é periódica e, portanto previsível para qualquer instante de tempo. Por isso, é necessário separar as componentes astronômica e meteorológica dos registros dos marégrafos. Isto é realizado através de uma análise harmônica das séries de níveis medidas por cada marégrafo.

Após a obtenção das componentes harmônicas da maré astronômica em cada um dos pontos em que os dados de marégrafo estão disponíveis é possível realizar a previsão da série de dados de marés astronômicas para um período de tempo específico. Com isso, pode-se prever um ano base, que serão comparados com os conjuntos de dados SMC-Brasil para o mesmo período.

Se após essa comparação conclui-se que os dados do SMC-Brasil se ajustam corretamente à previsão da maré astronômica obtida com base nos dados maregráficos, a base de dados do SMC-Brasil fica validada.

Resumindo, os passos a seguir para se realizar a validação são:

- Análise harmônica das séries de dados medidas para cada marégrafo, obtendo-se as componentes harmônicas da maré astronômica para cada um deles;
- Previsão da série de níveis de maré astronômica, a partir das componentes harmônicas para um ano base;
- Comparação do ano base com a série de dados do ponto mais próximo do marégrafo disponível na base de dados do SMC-Brasil;
- O ajuste entre ambas séries de dados foi estudada por meio do cálculo de vários parâmetros estatísticos, descritos nas próximas seções.

#### 1.4.1. Parâmetros estatísticos estudados

Para quantificar a qualidade do ajuste entre as séries de dados do SMC-Brasil com os dados medidos por marégrafos são definidos uma série de parâmetros que quantificam o desvio dos pares de dados (SMC-Brasil-Marégrafo) sobre a bissetriz: BIAS, RMSE,  $\rho$  e o índice de dispersão.

O viés ou BIAS mede o desvio sistemático entre duas variáveis com a diferença entre as médias dessas variáveis, dando informações sobre quanto os momentos de ordem 1 diferem entre si.

$$BIAS = \bar{x} - \bar{y} \quad (24)$$

O erro quadrático médio (RMSE, *Root Mean Square Error*) mede a precisão com que duas variáveis se parecem, tendo em conta tanto o quadrado do viés e a variância ou precisão entre elas, incluindo informações dos momentos de ordem 1 e 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (25)$$

O coeficiente de correlação da regressão, para o modelo de regressão  $(y_i) \hat{y}_i = x_i$  (reta bissetriz) é chamado de coeficiente de correlação da reta bissetriz ou  $\rho$ . O coeficiente de correlação mede a intensidade da relação de igualdade entre duas variáveis e é definido entre 0 e 1, utilizando o último valor quando existe uma perfeita correlação entre ambas variáveis, ou seja, seus valores são iguais.

$$\rho = \sqrt{R^2} \quad (26)$$

Onde  $R^2$  neste caso é o percentual de ajuste entre as duas variáveis:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 + (x_i - \bar{y})^2} \quad (27)$$

Um ajuste linear da variável  $x$  frente a  $y$  adota a fórmula  $y = m * x + b$ , onde  $m$  e  $b$  são os coeficientes de ajuste. A inclinação da reta é representada pelo coeficiente  $m$ , que tem valores próximos de 1 quando as duas variáveis ( $x$  e  $y$ ) são semelhantes.

### 1.4.2. Função de distribuição

Os marégrafos localizados nos estuários se encontram em águas rasas, de modo que registram séries em que a deformação e o desfasamento da onda de maré é importante. Portanto, nesses pontos se realiza uma análise diferente, onde a função de distribuição é calculada e os quantis das séries são comparados (medida pelo marégrafo e a base de dados do SMC-Brasil).

A função de distribuição de uma série de dados mostra para cada valor da série (cada nível da maré astronômica deste estudo) a probabilidade de ter um nível igual ou inferior ao mesmo.

Desta função de distribuição os quantis podem ser extraídos. Este documento apresenta os quantis de 25%, 50%, 95% e 99%, representando níveis de maré astronômicas que excedem 75%, 50%, 25% e 1% do tempo, respectivamente.

## 1.5. Resultados

Após a realização do procedimento descrito na seção anterior, para cada um dos marégrafos são obtidos uma série de indicadores que permitem a validação dos dados de níveis do SMC-Brasil.

Nos subitens seguintes há uma série de gráficos e quadros ilustrativos dos resultados obtidos durante a validação.

### 1.5.1. Marégrafos localizados na costa

Os marégrafos localizados na costa são empregados para validar dados de níveis de maré astronômica do SMC-Brasil de pontos próximos aos mesmos (Quadro 6).

Os resultados obtidos em cada marégrafo são mostrados nas figuras abaixo (Figuras 50 a 70).

Maretrato : 20520  
(-47.35, -0.61667)

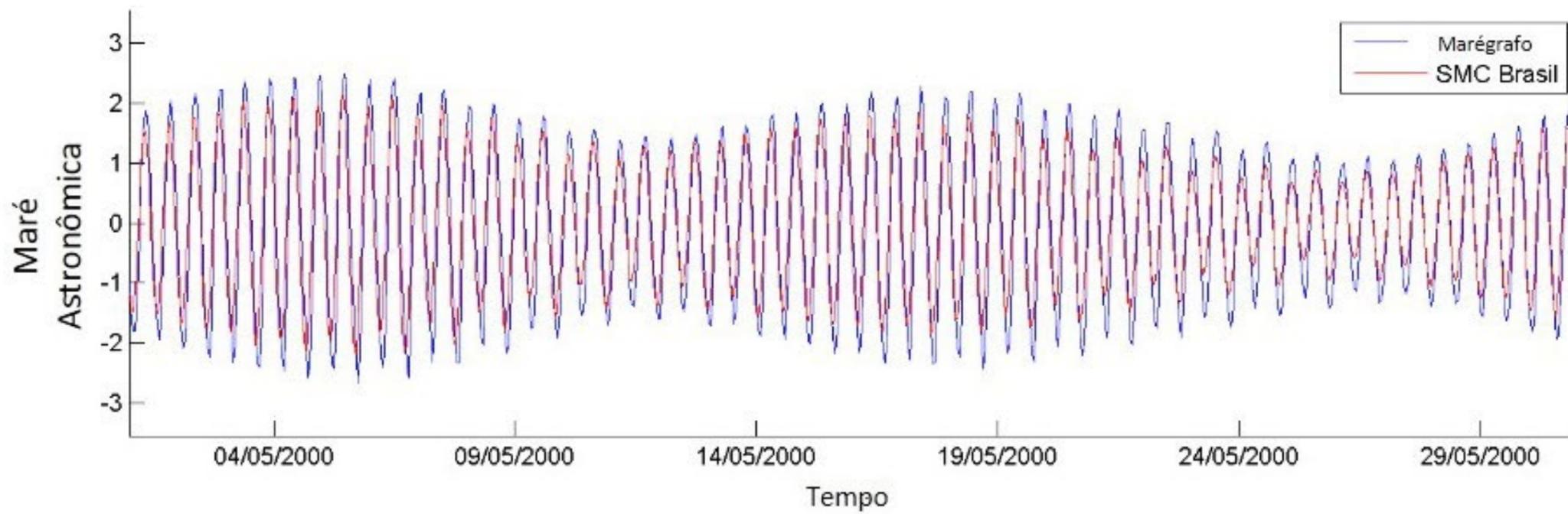
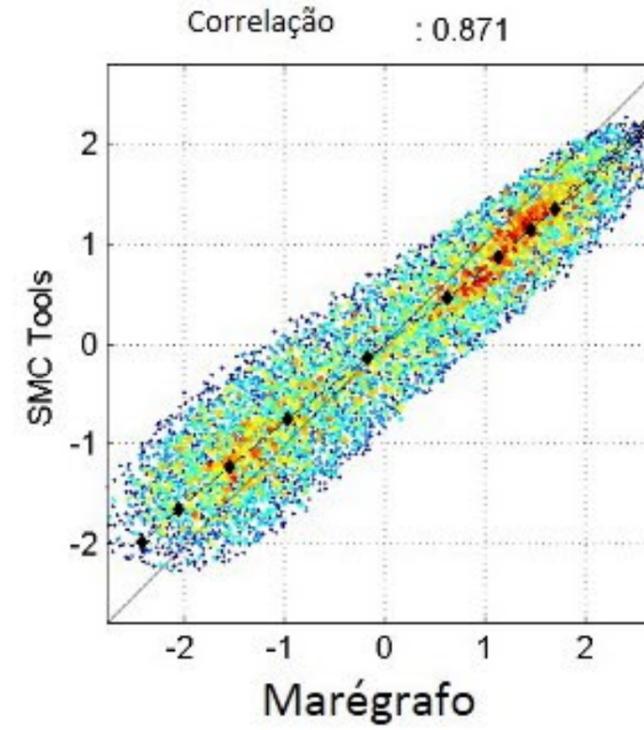
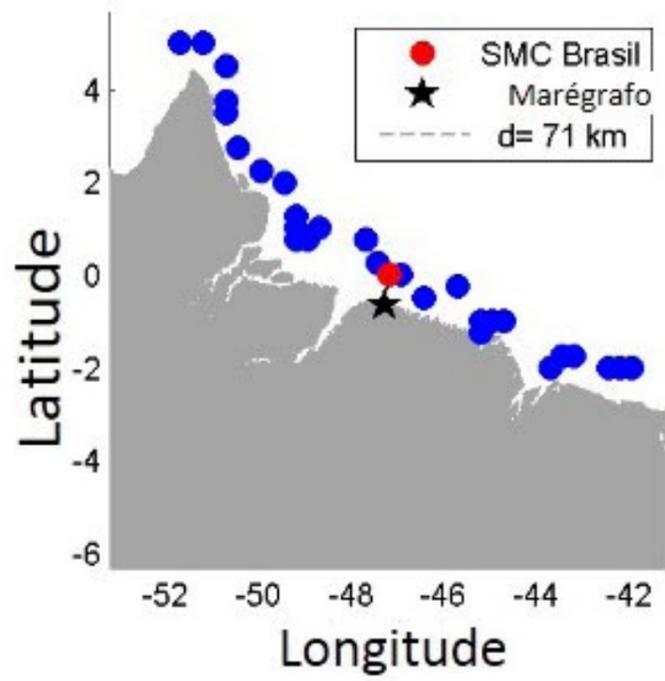


Figura 50: Resultados obtidos durante a validação do maretrato 20520.

Marégrafo : 30225  
(-41.645, -2.8517)

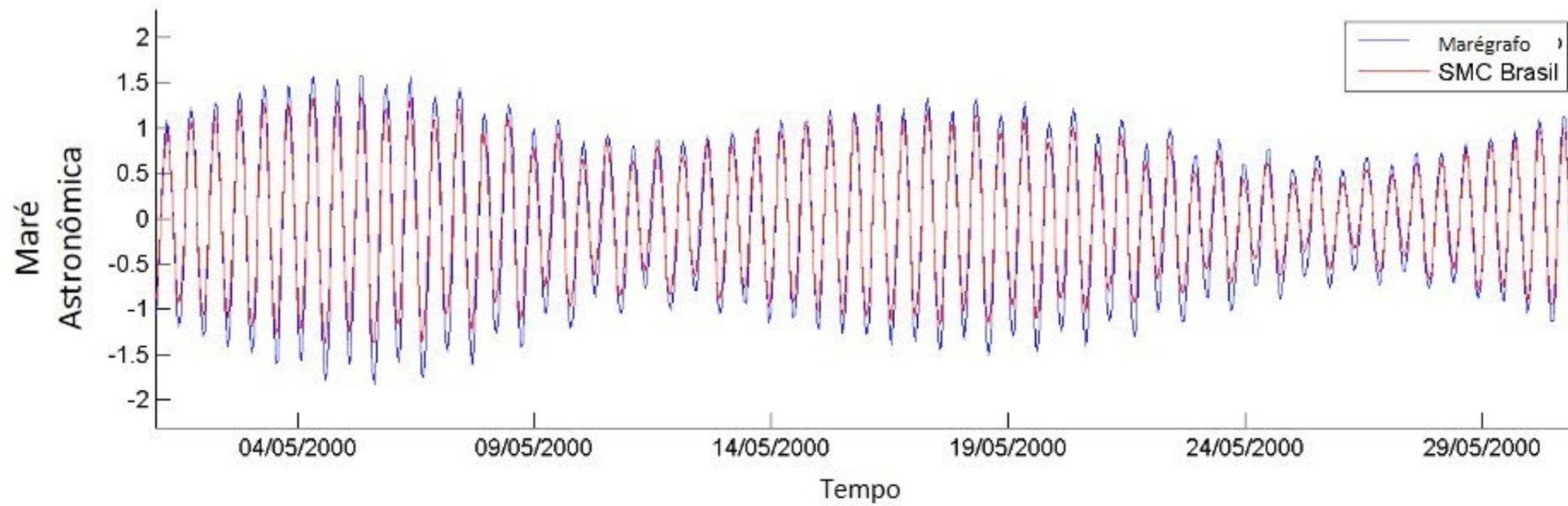
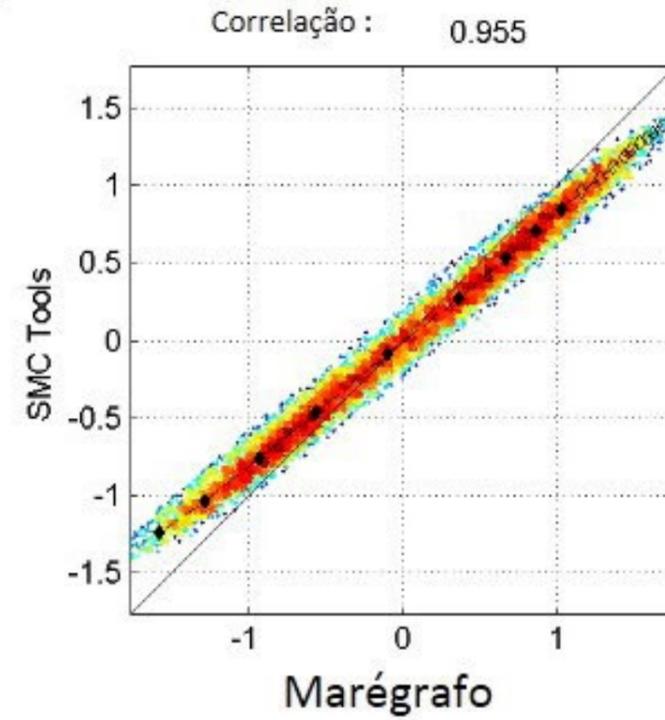
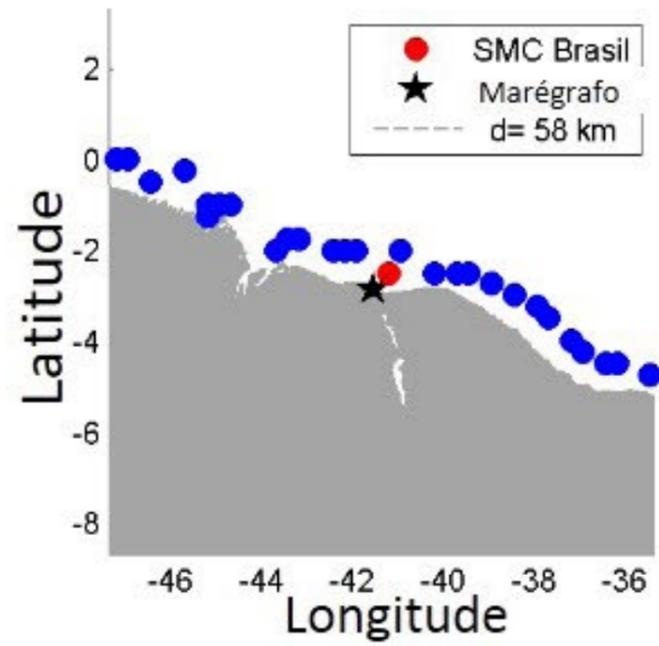


Figura 51: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30225.

Maretrato : 30337  
(-38.7983, -3.535)

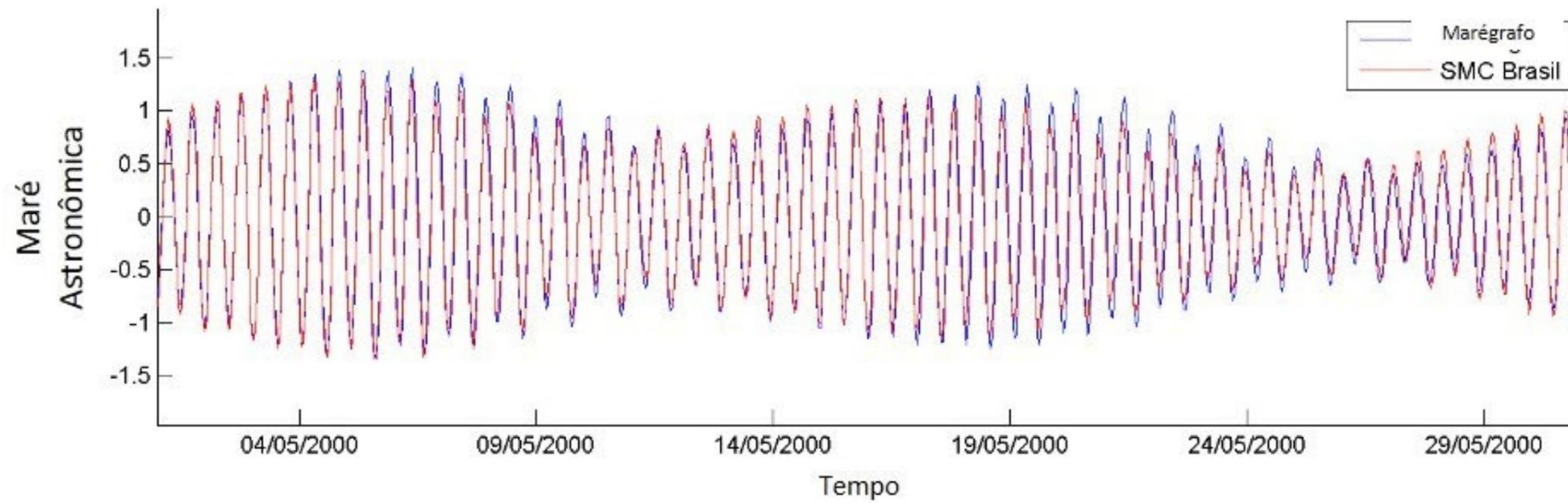
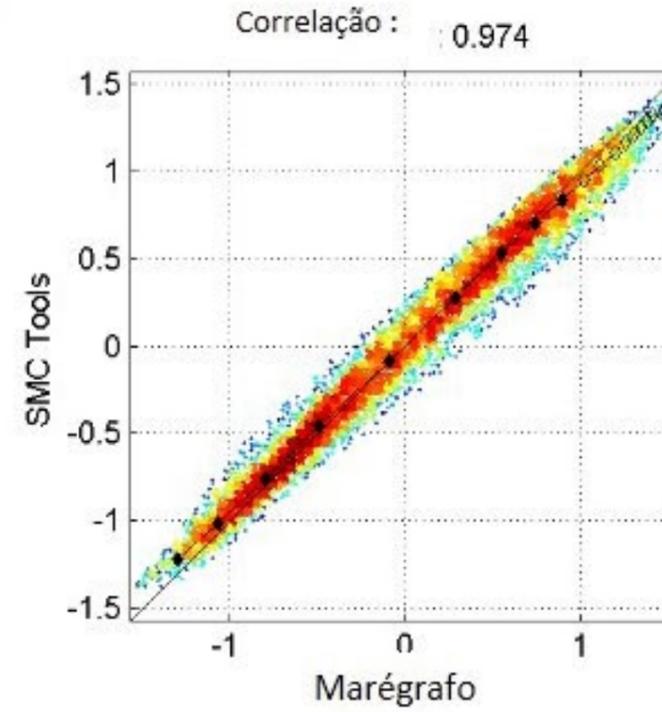
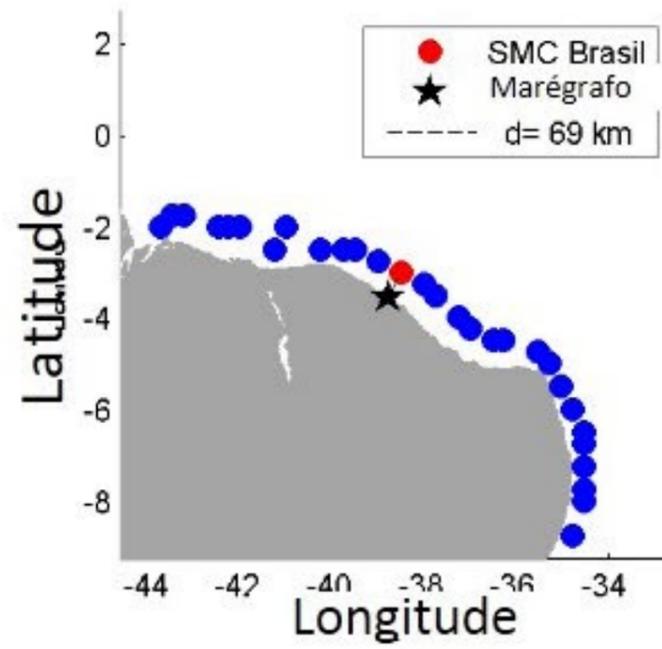


Figura 52: Resultados obtidos durante a validação do maretrato 30337.

Marégrafo : 30540  
(-34.84, -6.97)

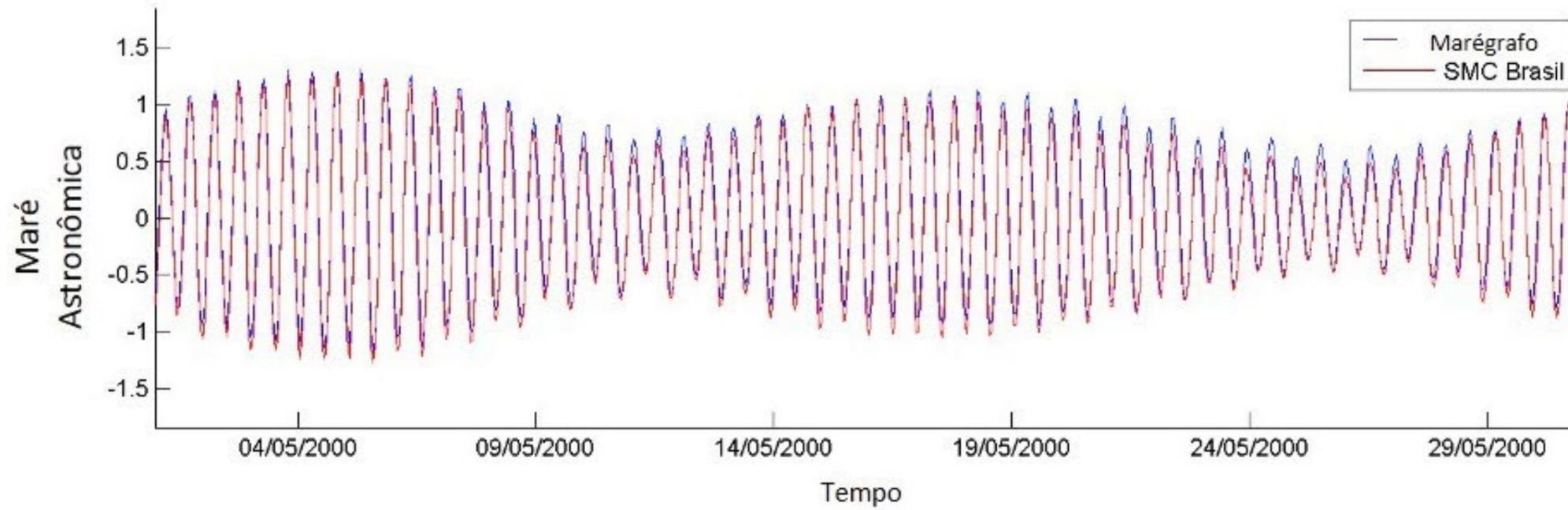
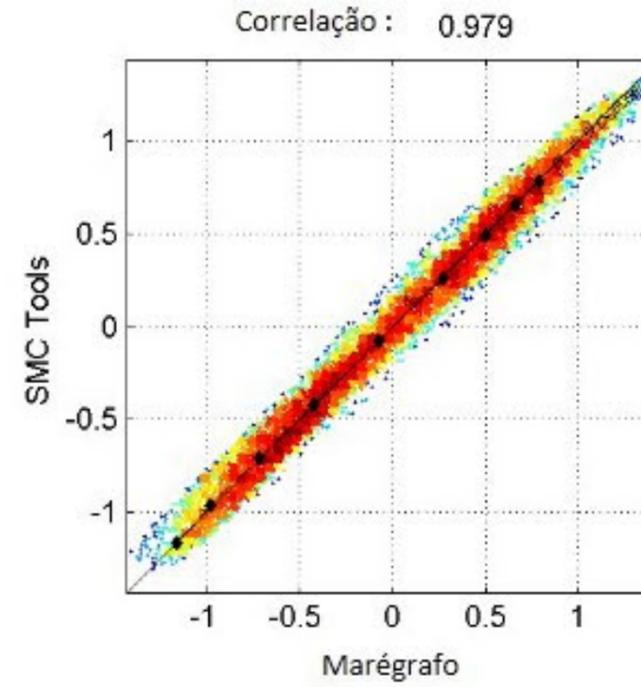
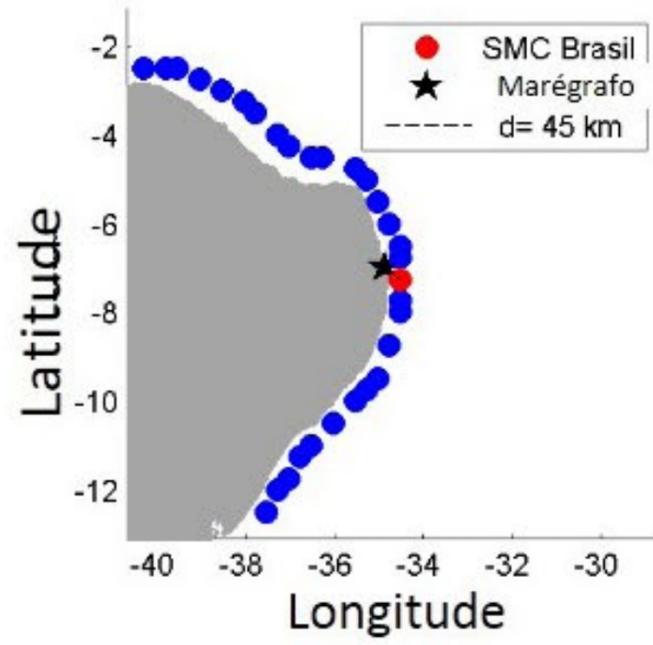


Figura 53: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30540.

Mareografo: 30725  
(-35.725, -9.6833)

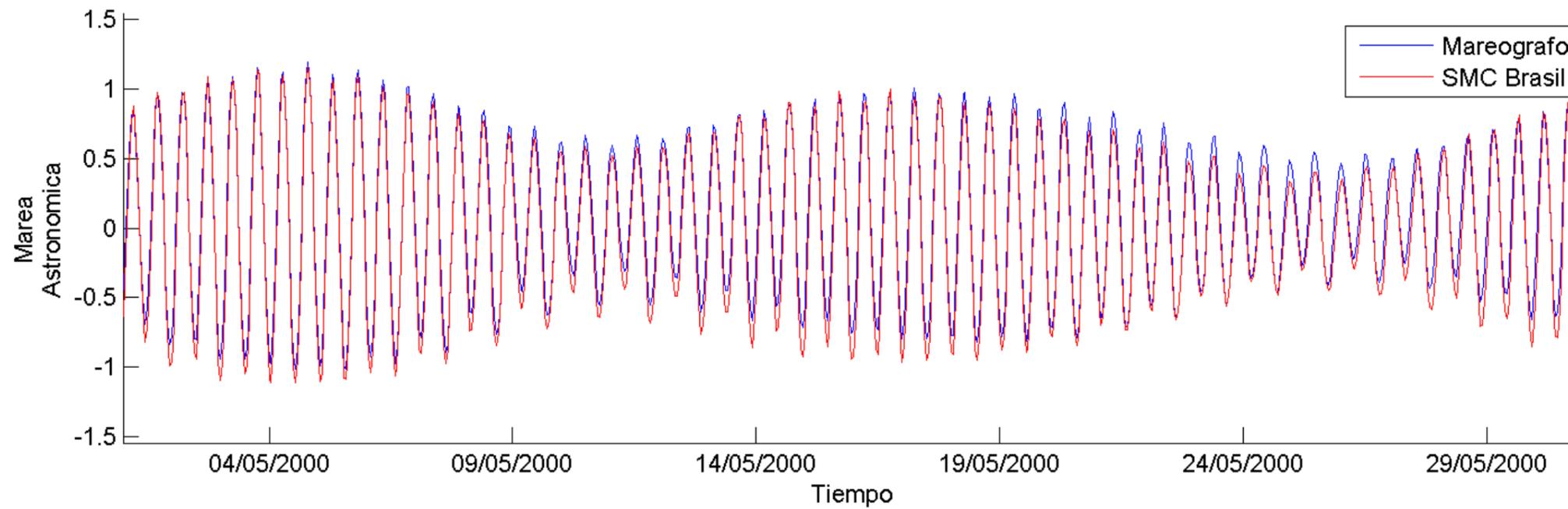
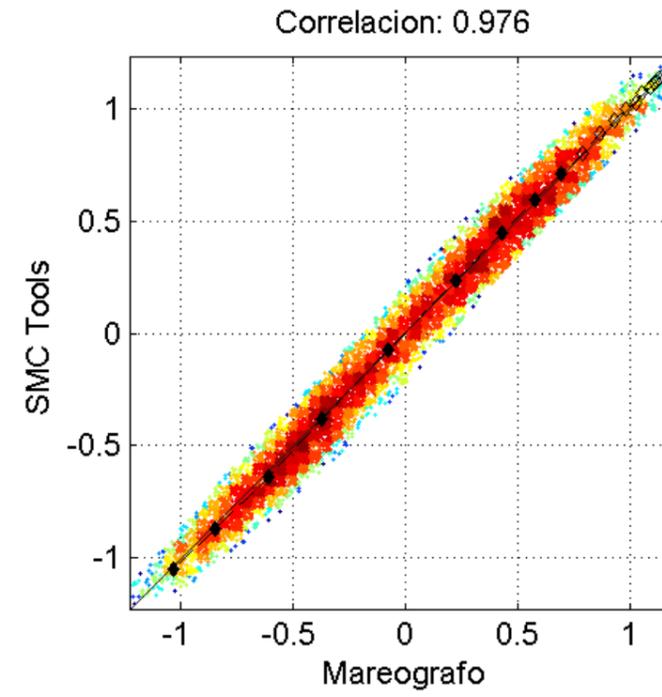
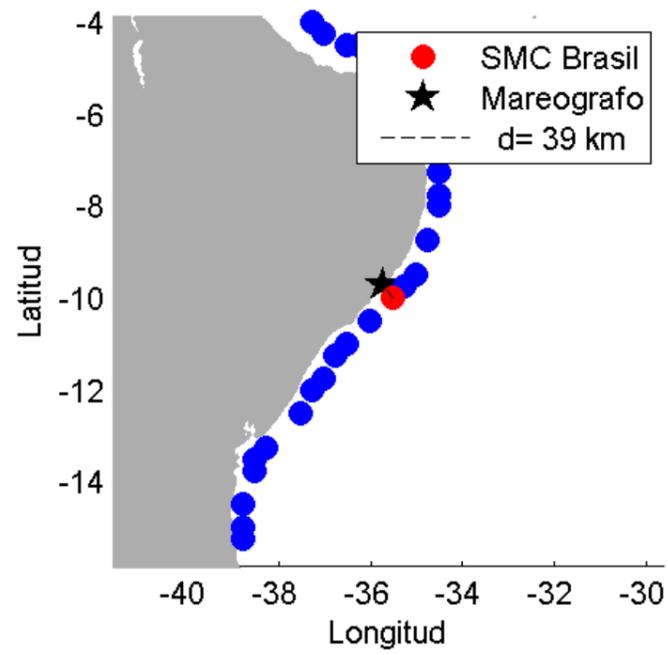


Figura 54: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30725.

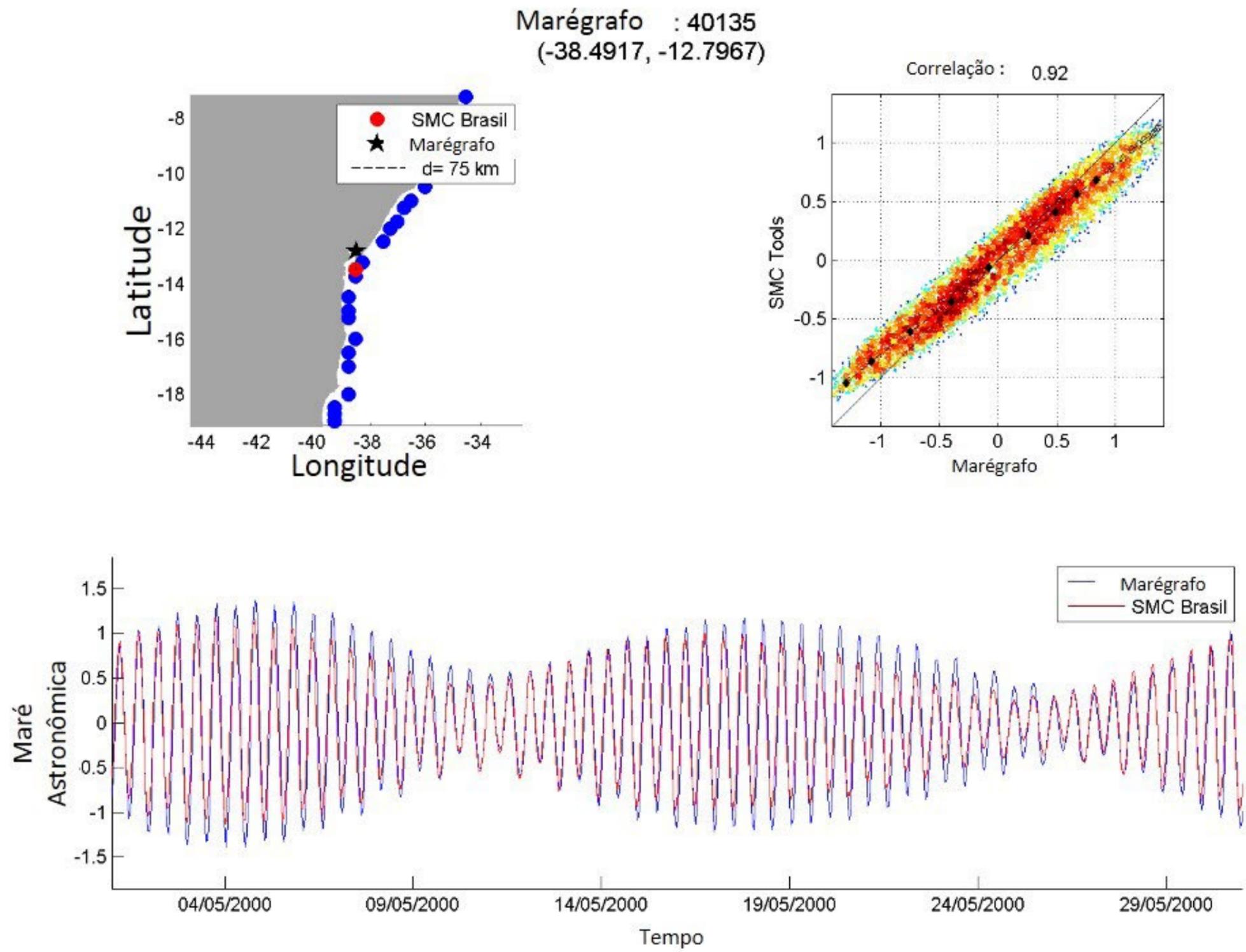


Figura 55: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40135.

Marégrafo: 40140  
(-38.5167, -12.965)

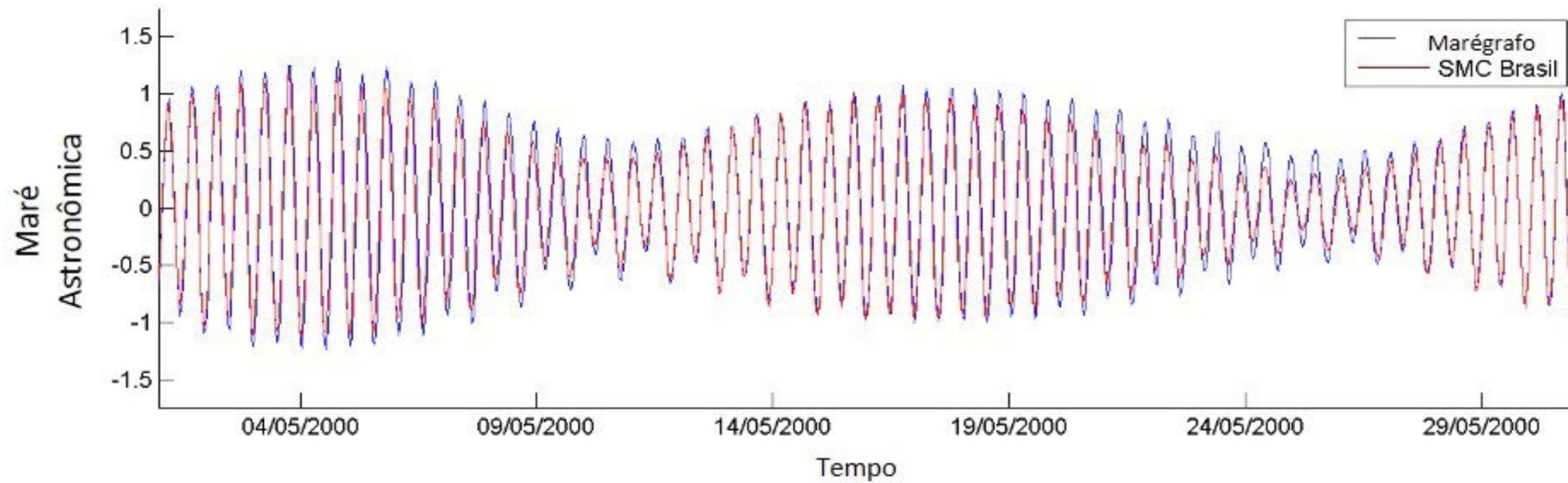
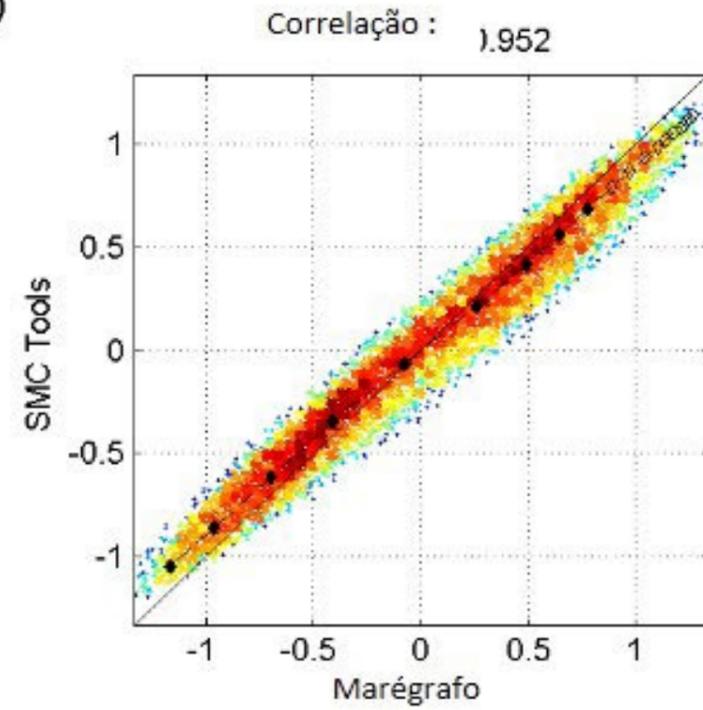
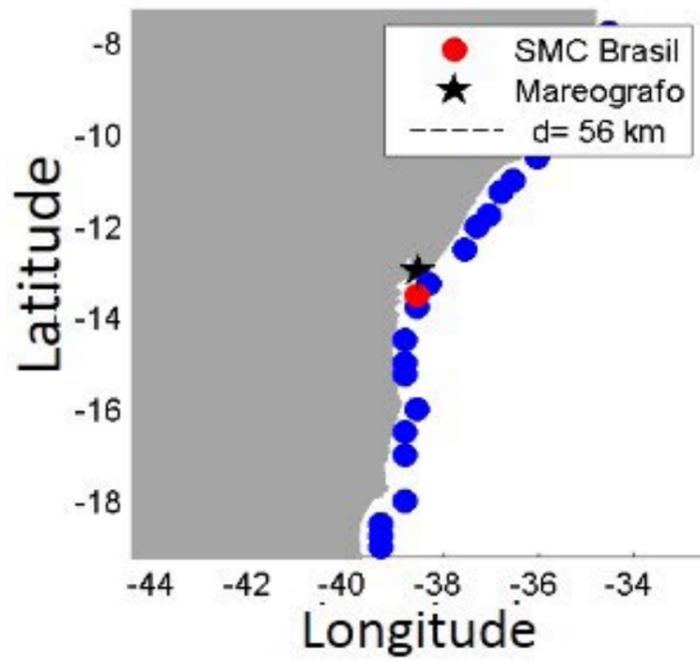


Figura 56: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40140.

Marégrafo: 40219  
(-40.335, -20.3217)

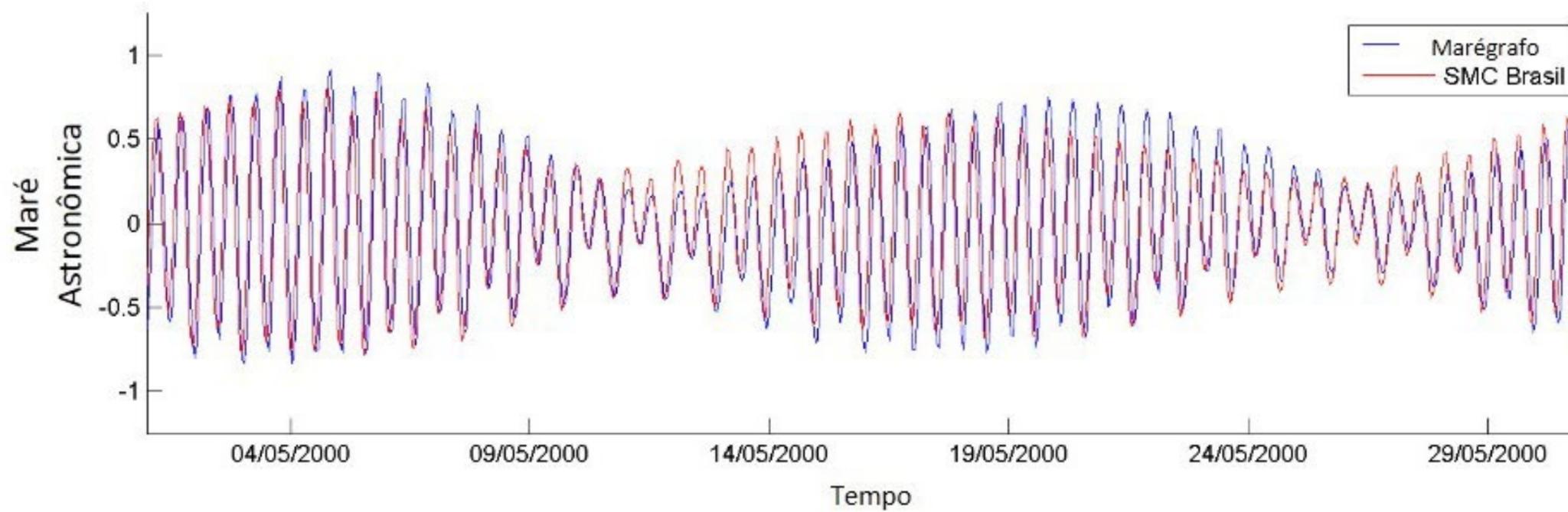
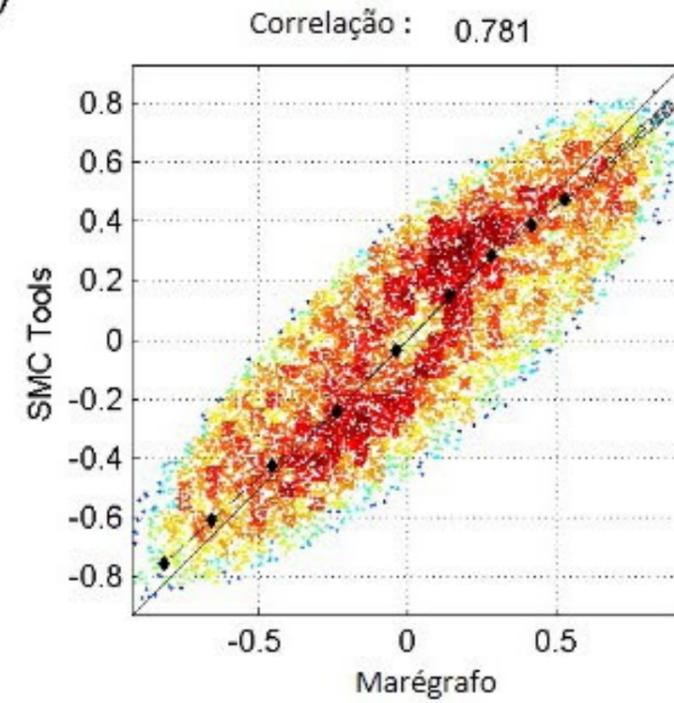
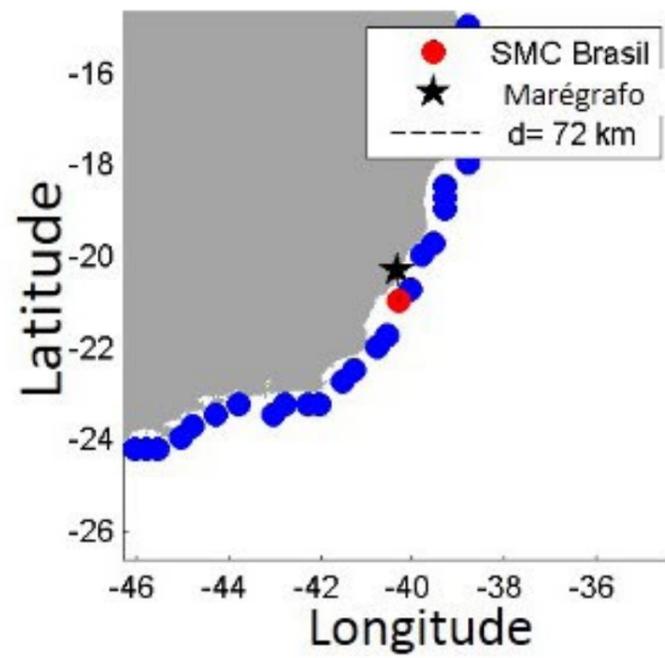


Figura 57: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40219.

Marégrafo: 40252  
(-40.2967, -20.3183)

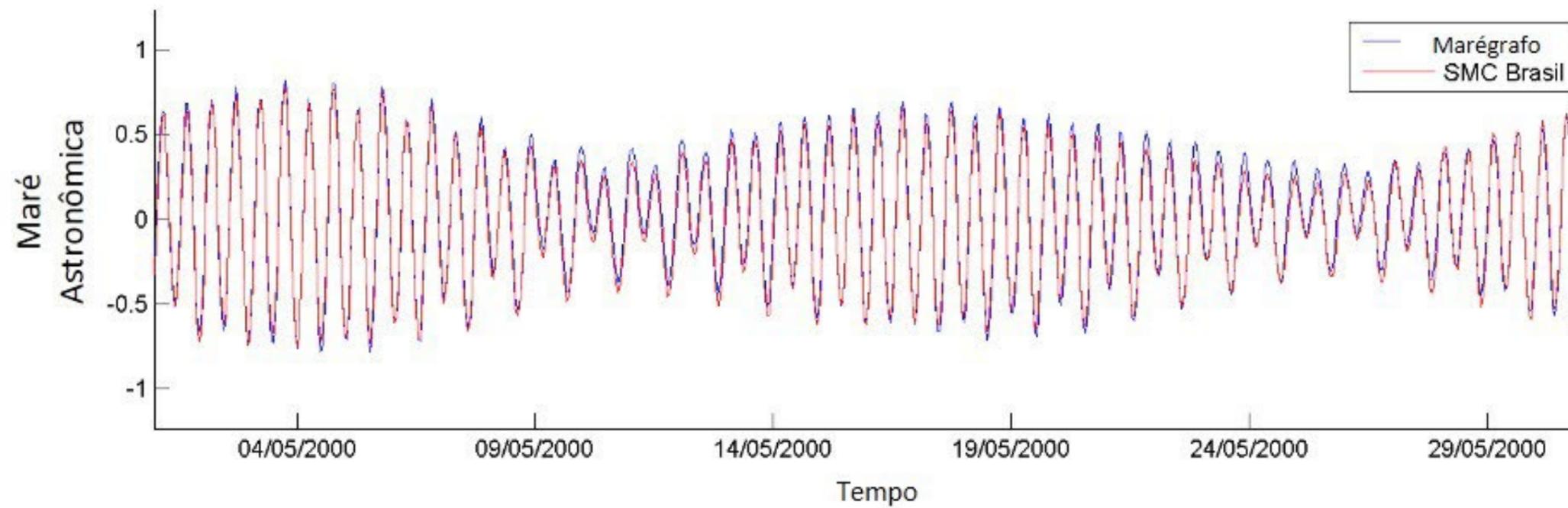
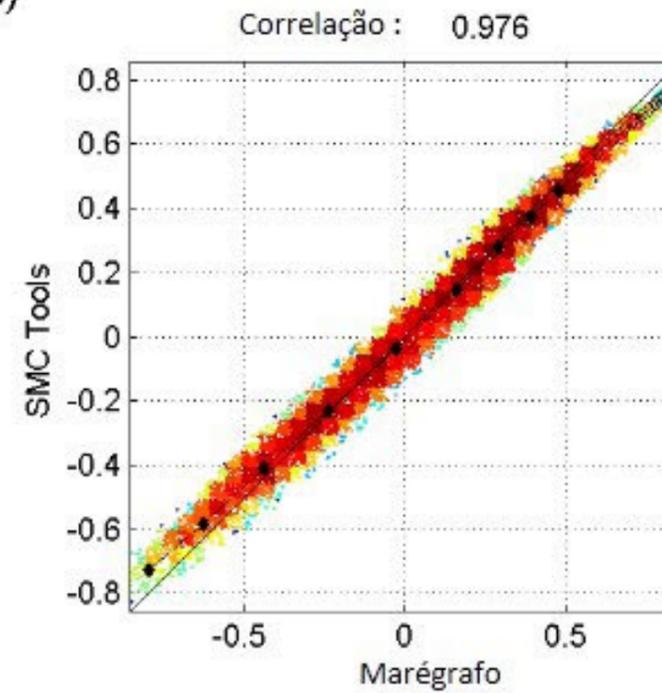
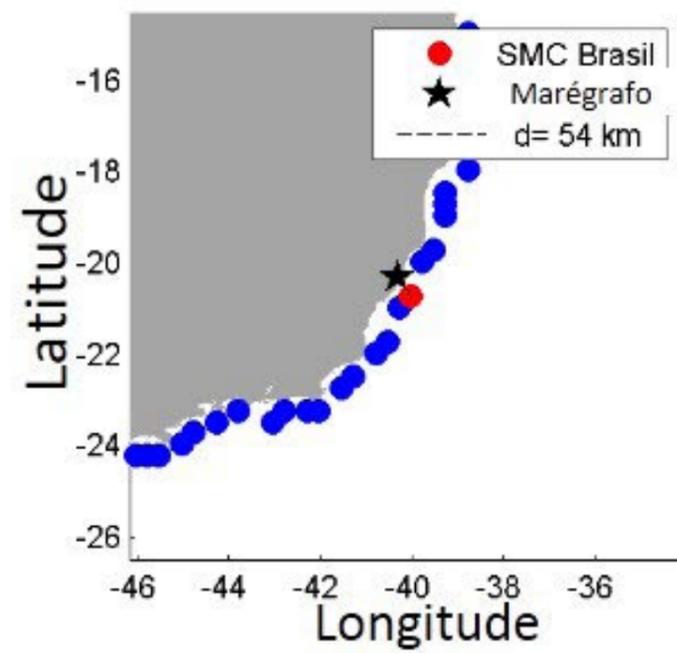


Figura 58: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40252.

Marégrafo: 40255  
(-40.2433, -20.2883)

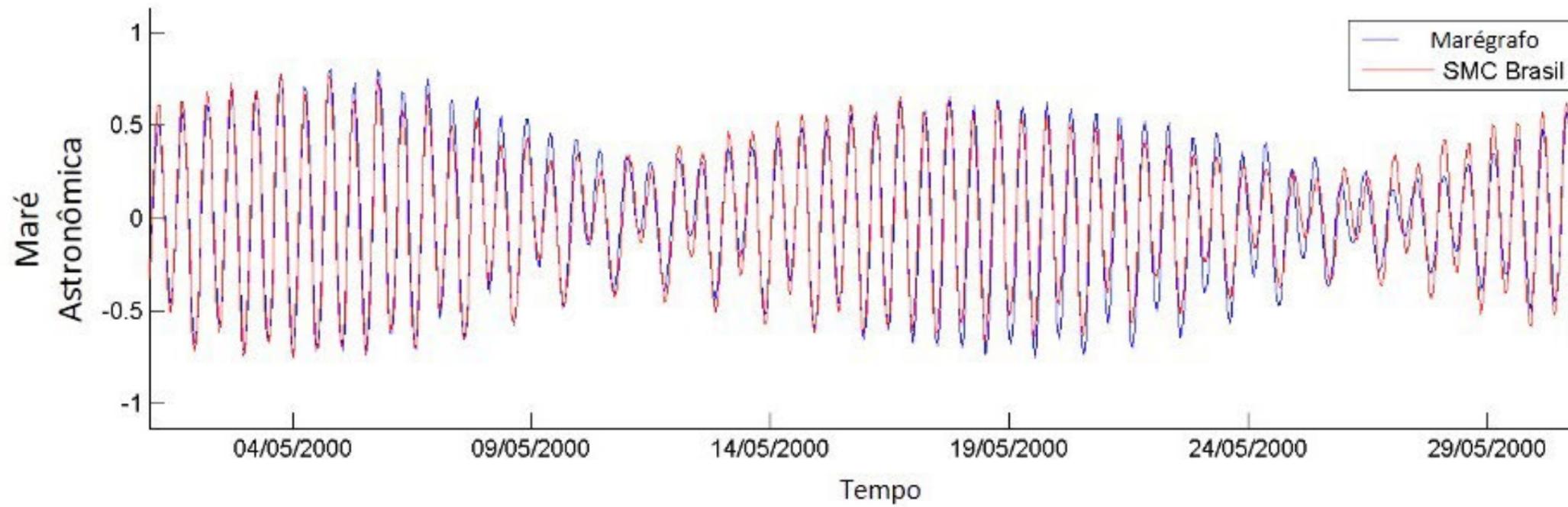
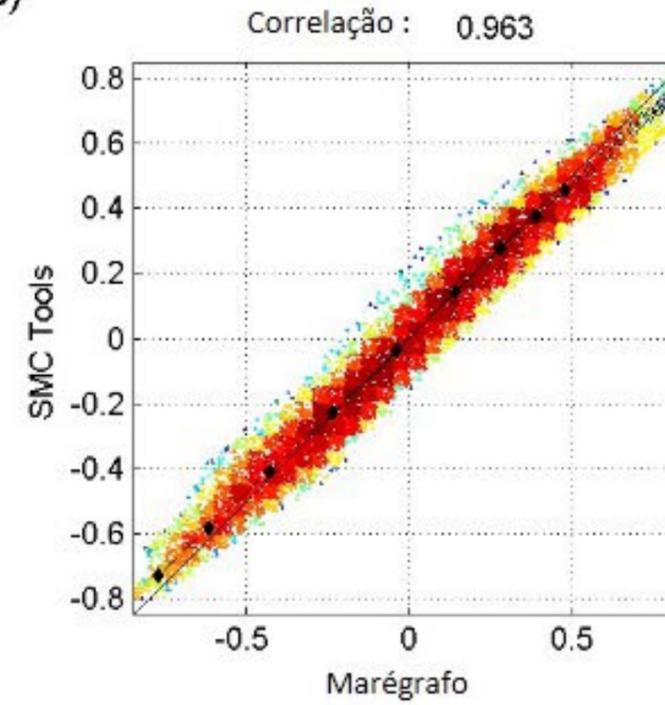
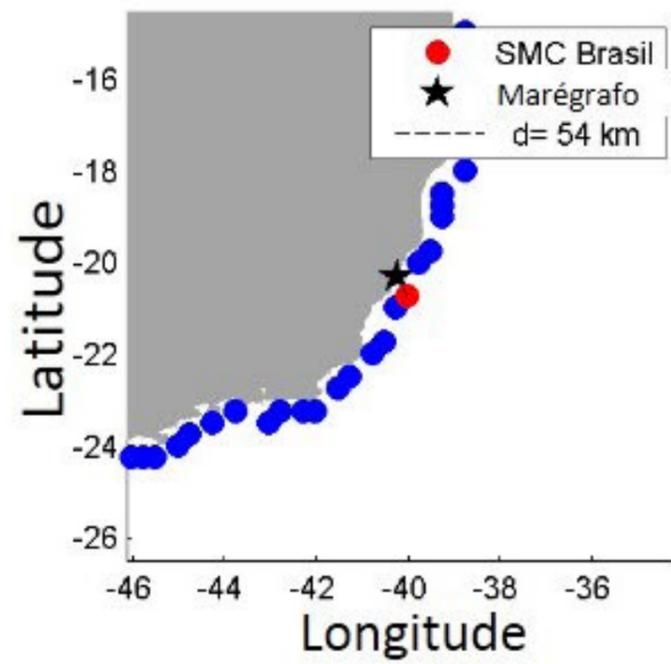


Figura 59: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 40255.

Marégrafo: 50116  
(-41.77, -22.385)

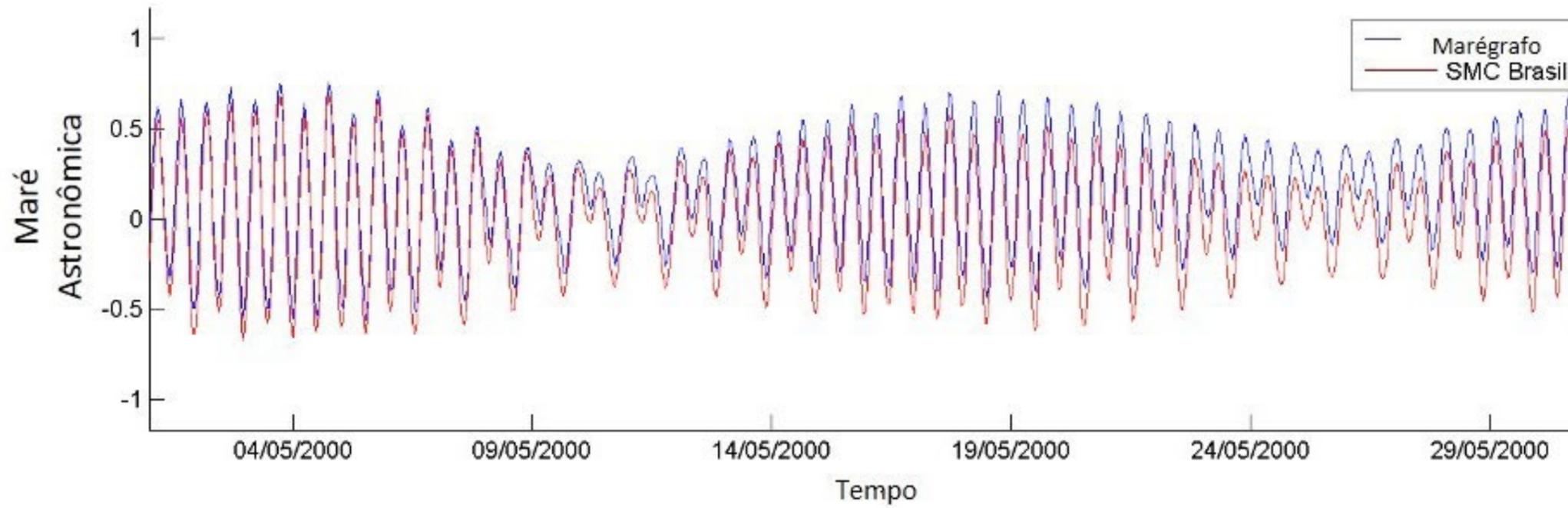
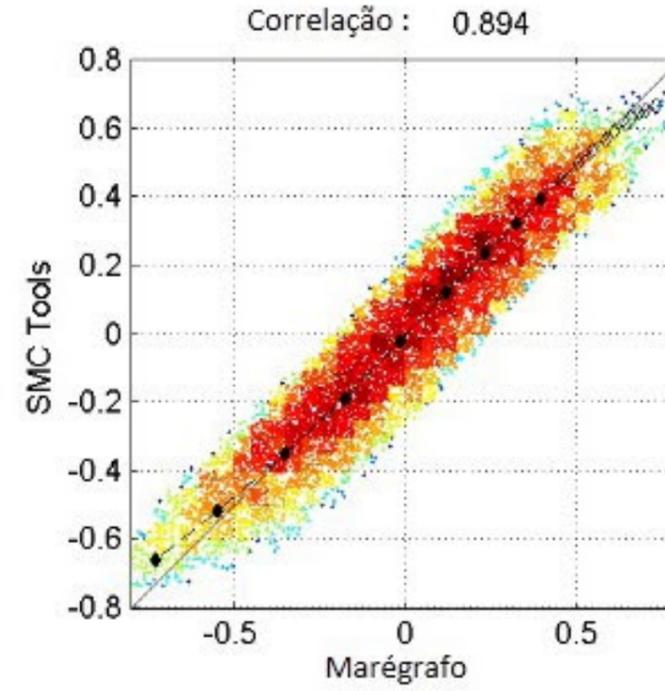
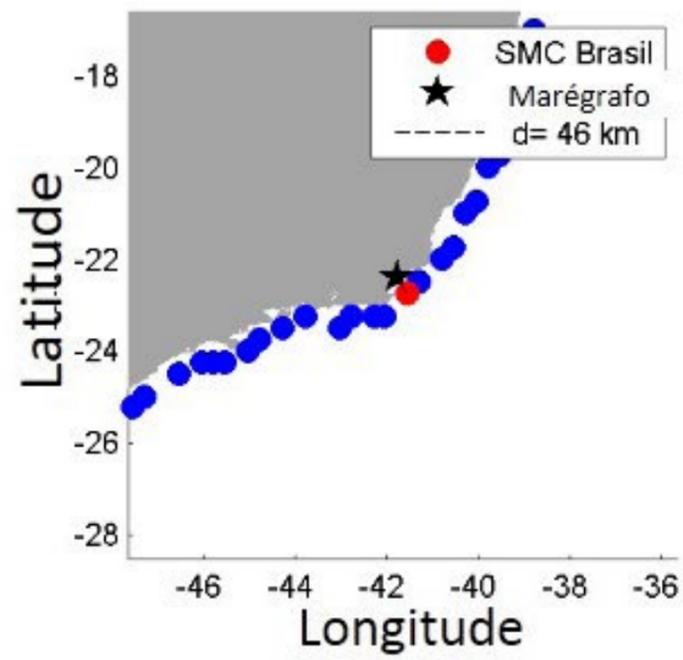


Figura 60: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50116.

Marégrafo: 50127  
(-43.1583, -22.7783)

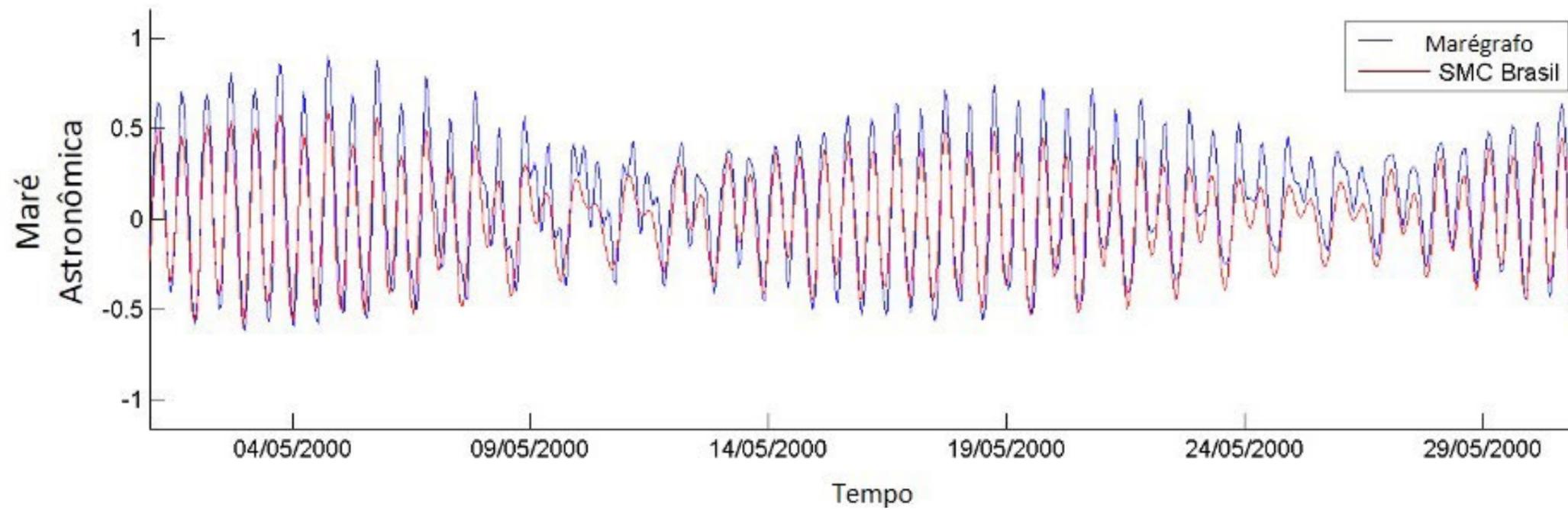
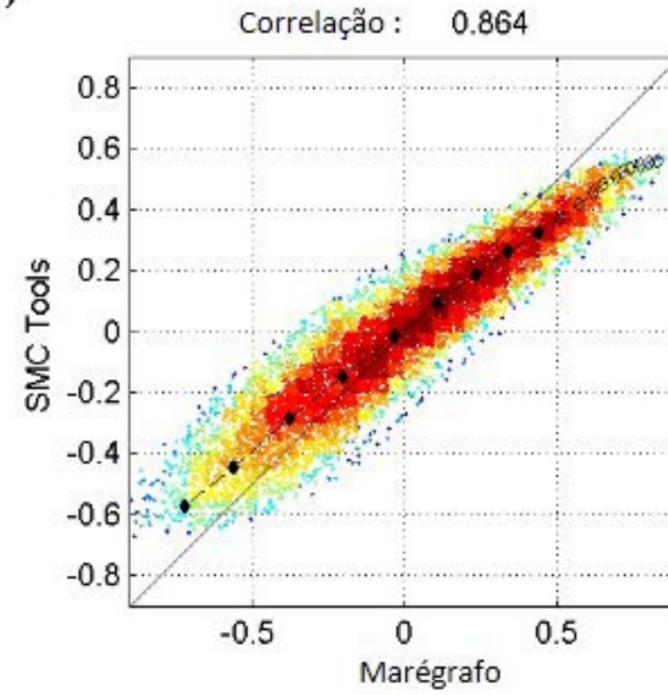
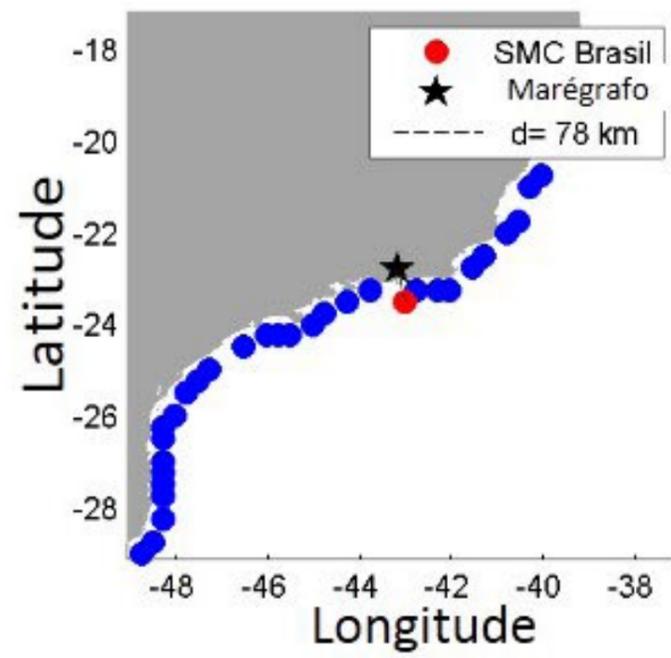


Figura 61: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50127.

Marégrafo: 50141  
(-43.135, -22.8833)

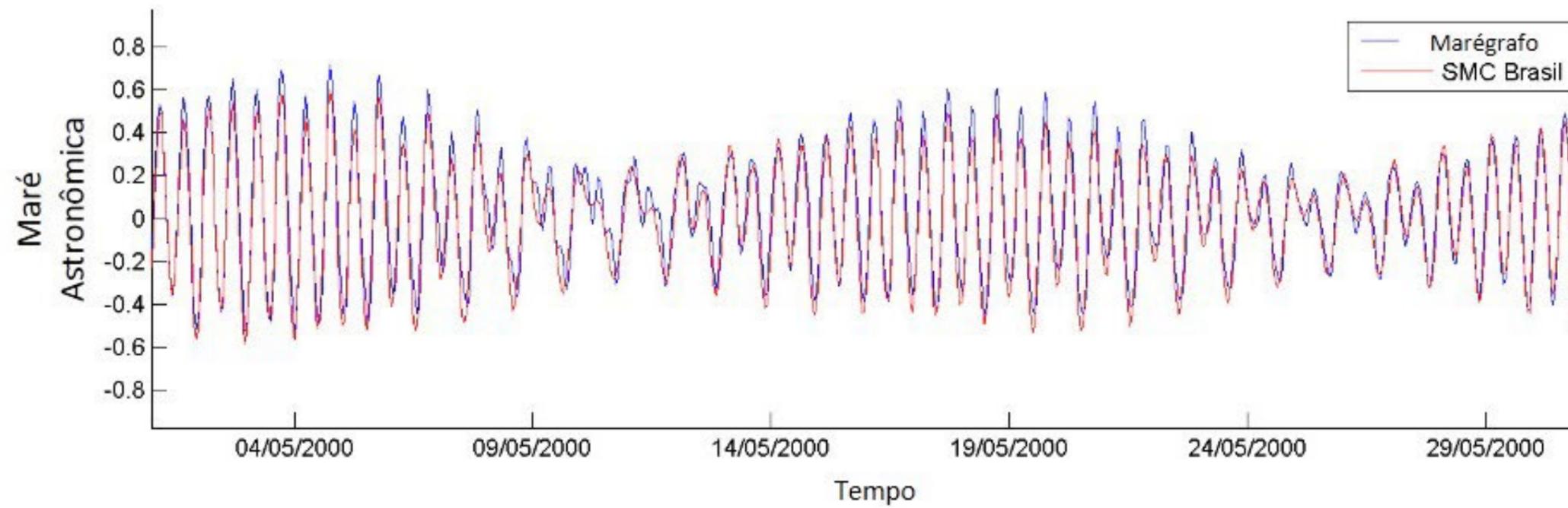
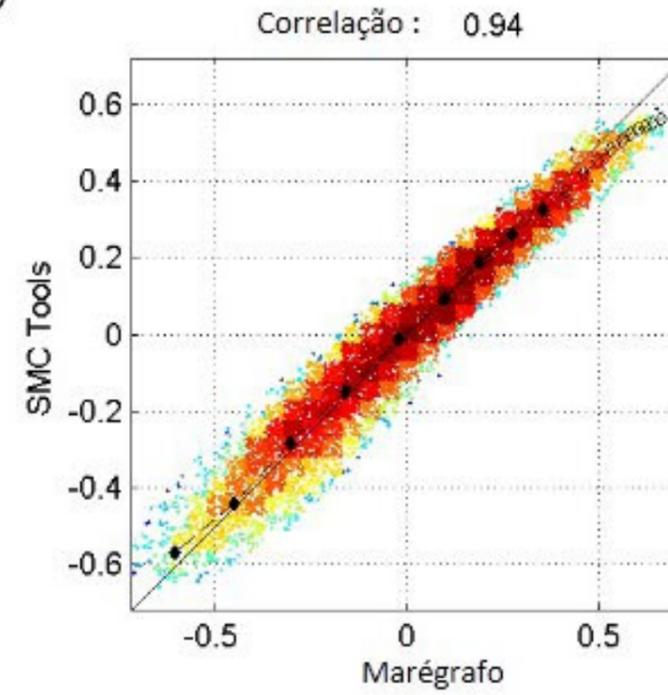
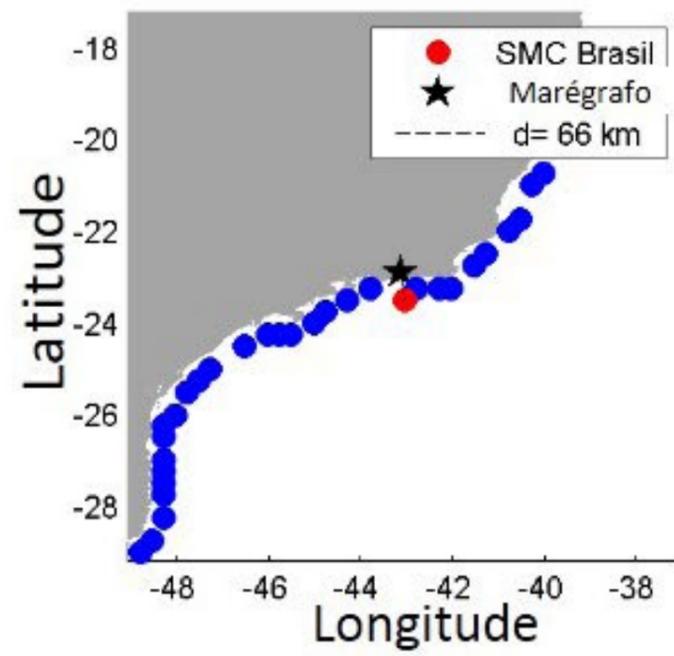


Figura 62: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50141.

Marégrafo: 50159  
(-43.1883, -22.985)

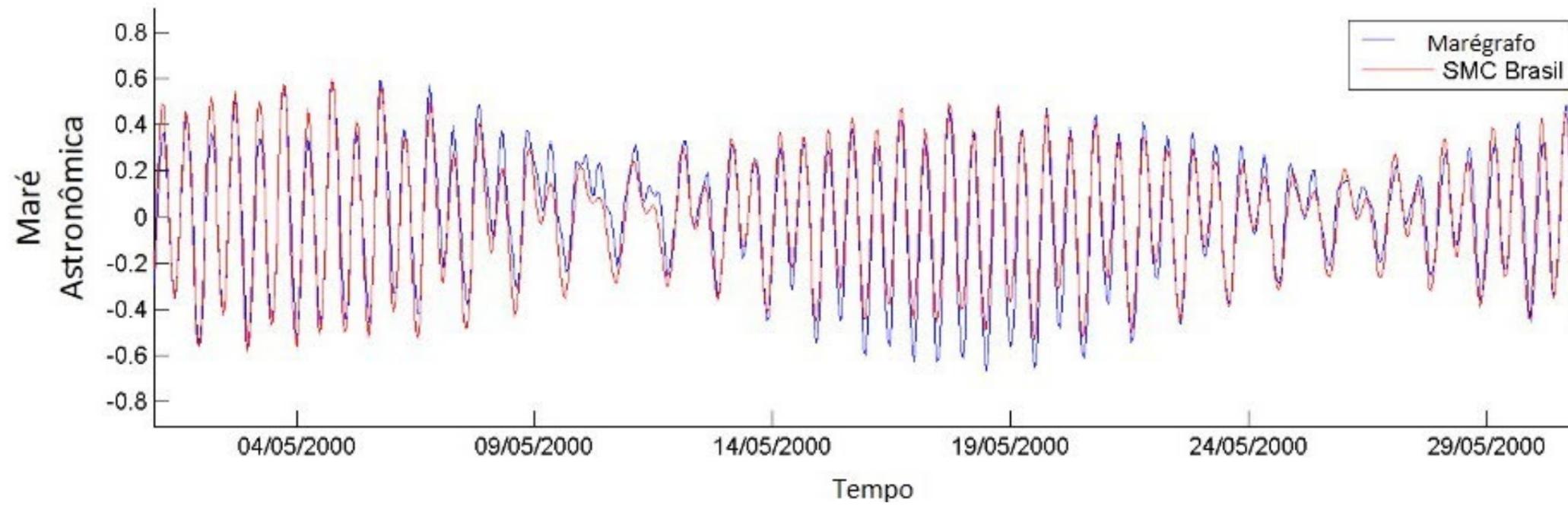
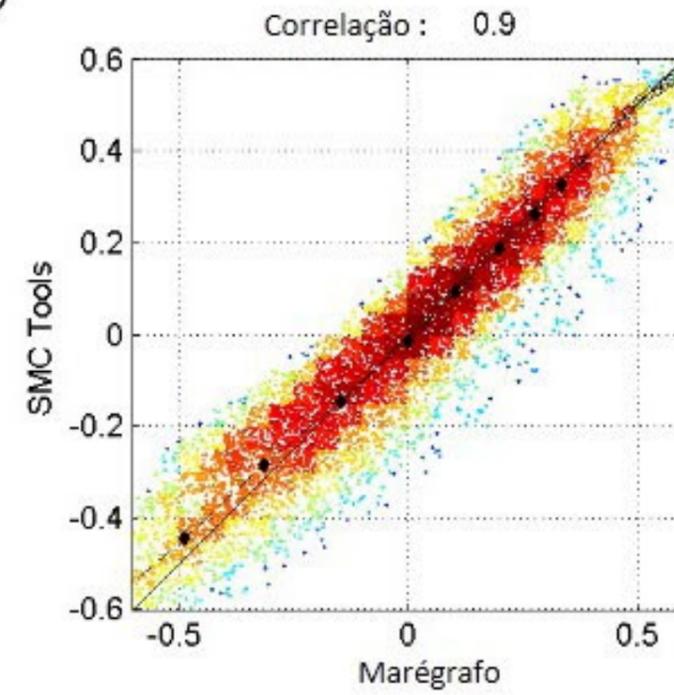
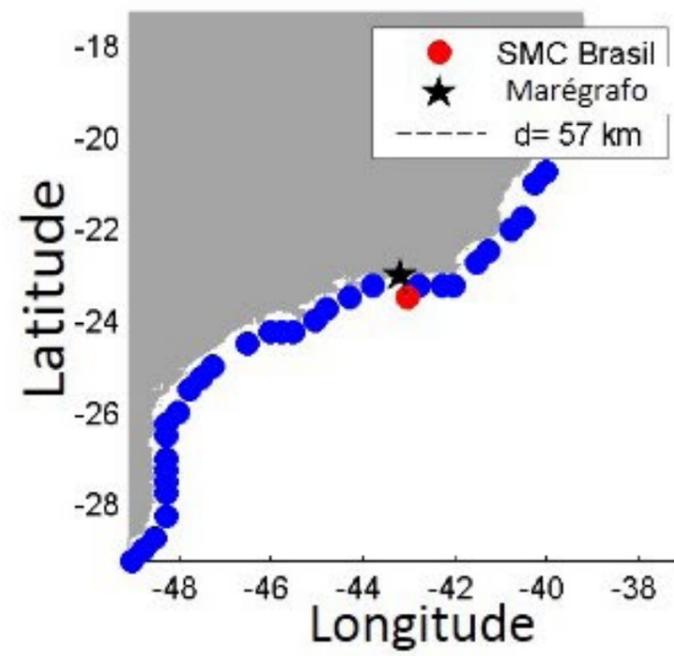


Figura 63: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50159.

Marégrafo: 50165  
(-44.0317, -23)

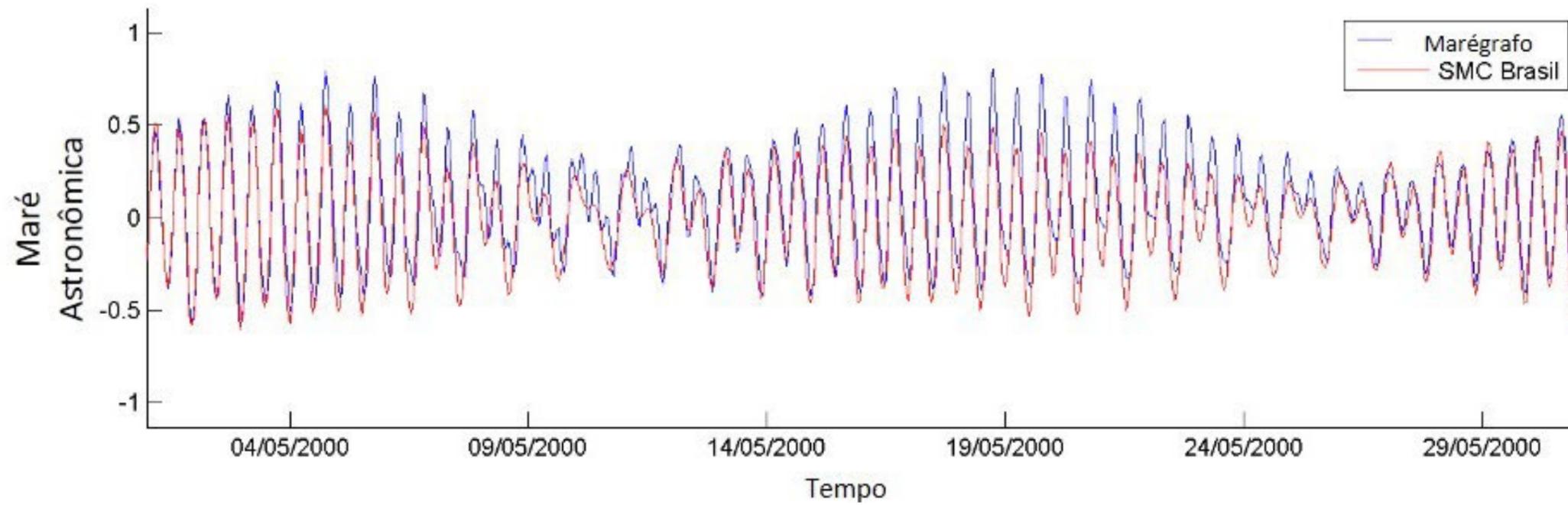
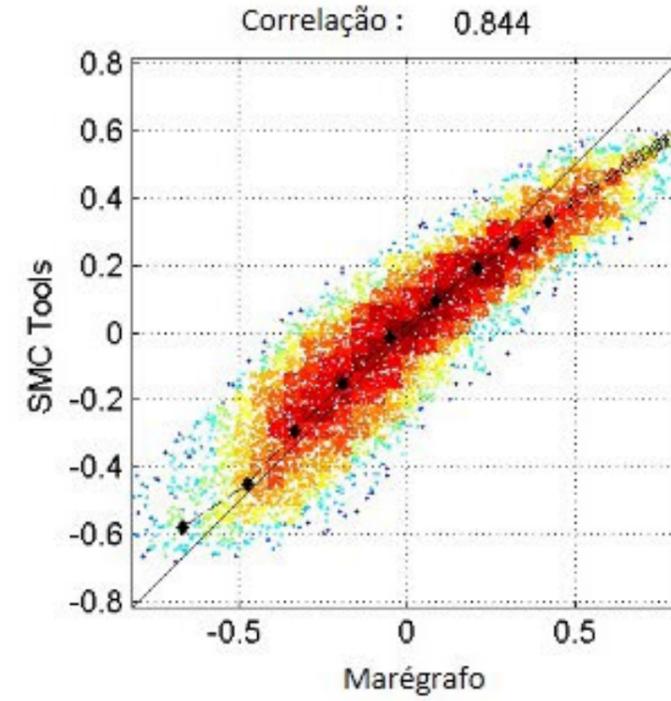
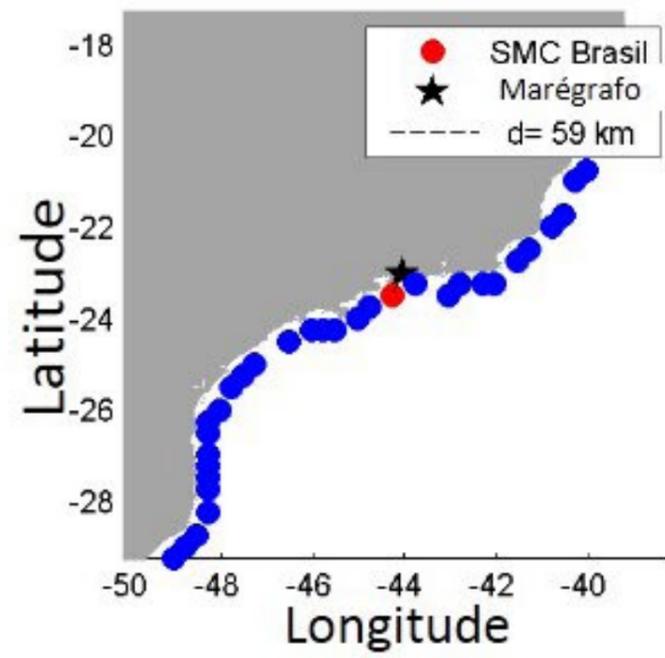


Figura 64: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50165.

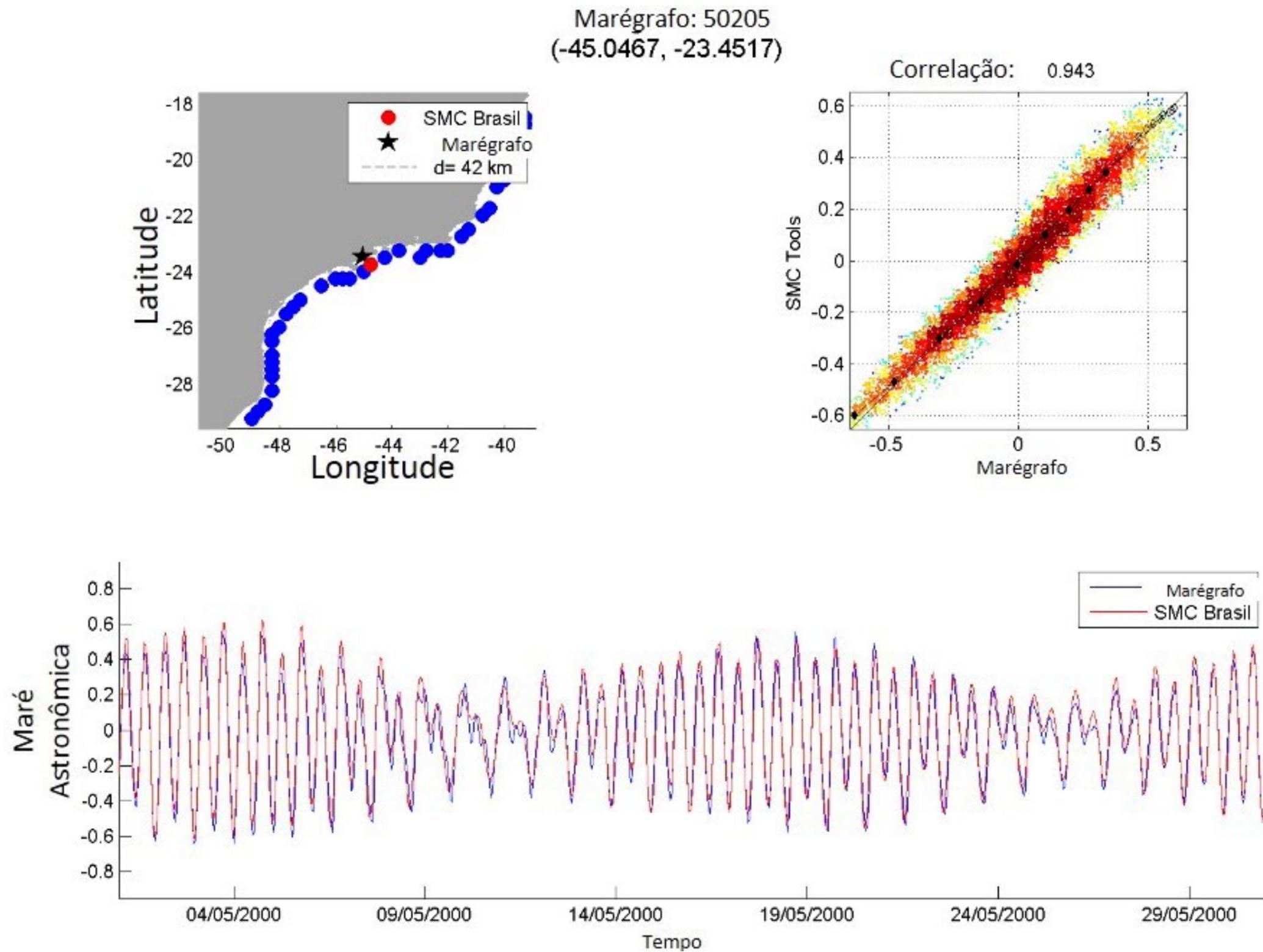


Figura 65: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 50205.

Marégrafo: 60132  
(-48.525, -25.5017)

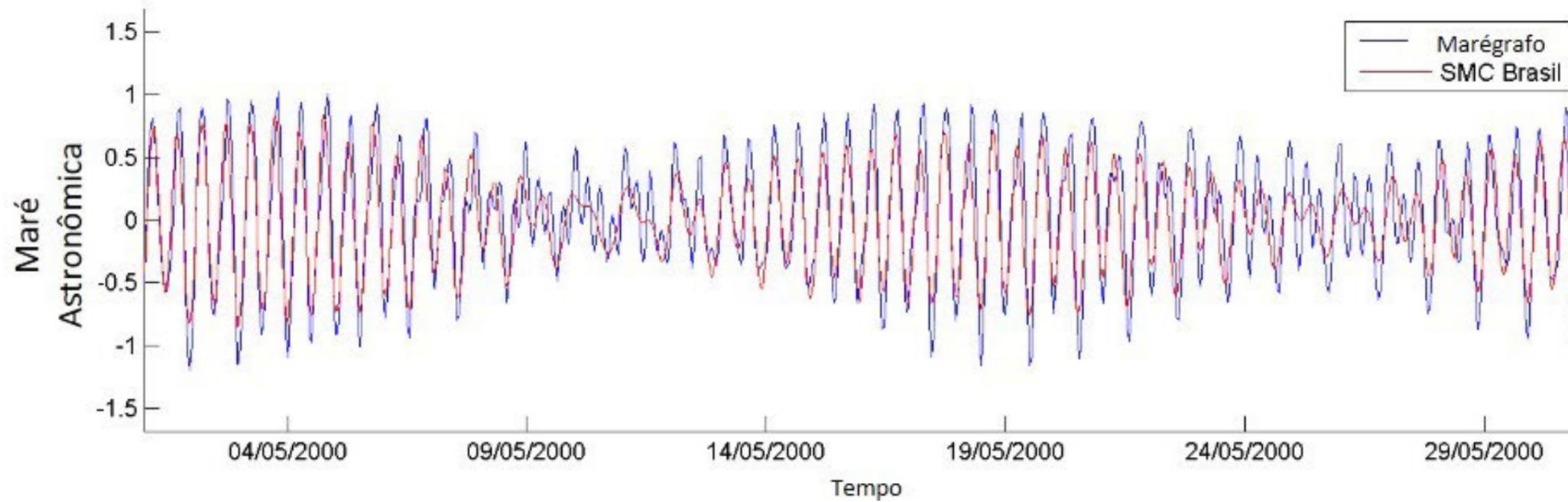
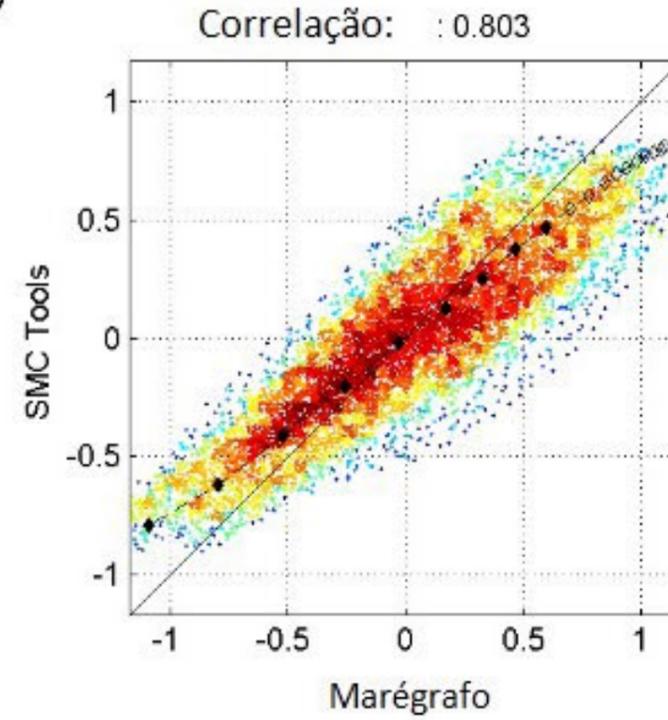
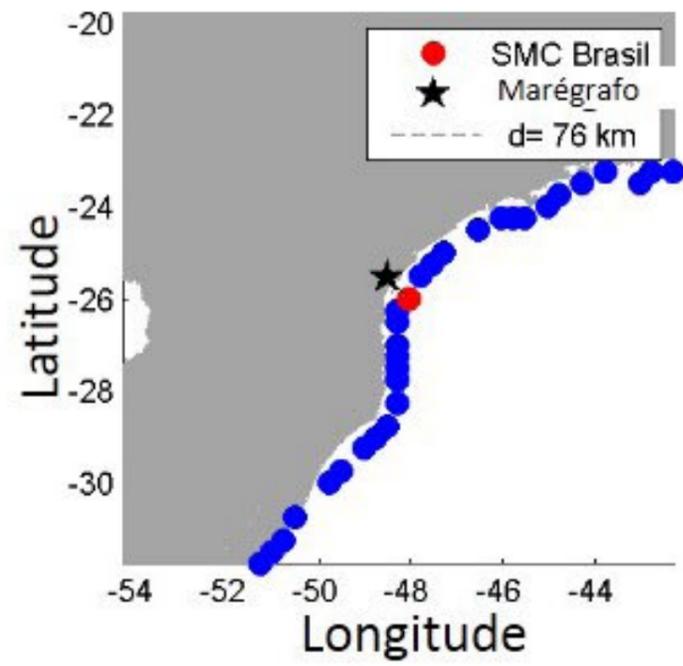


Figura 66: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60132.

Marégrafo: 60135  
(-48.3167, -25.5667)

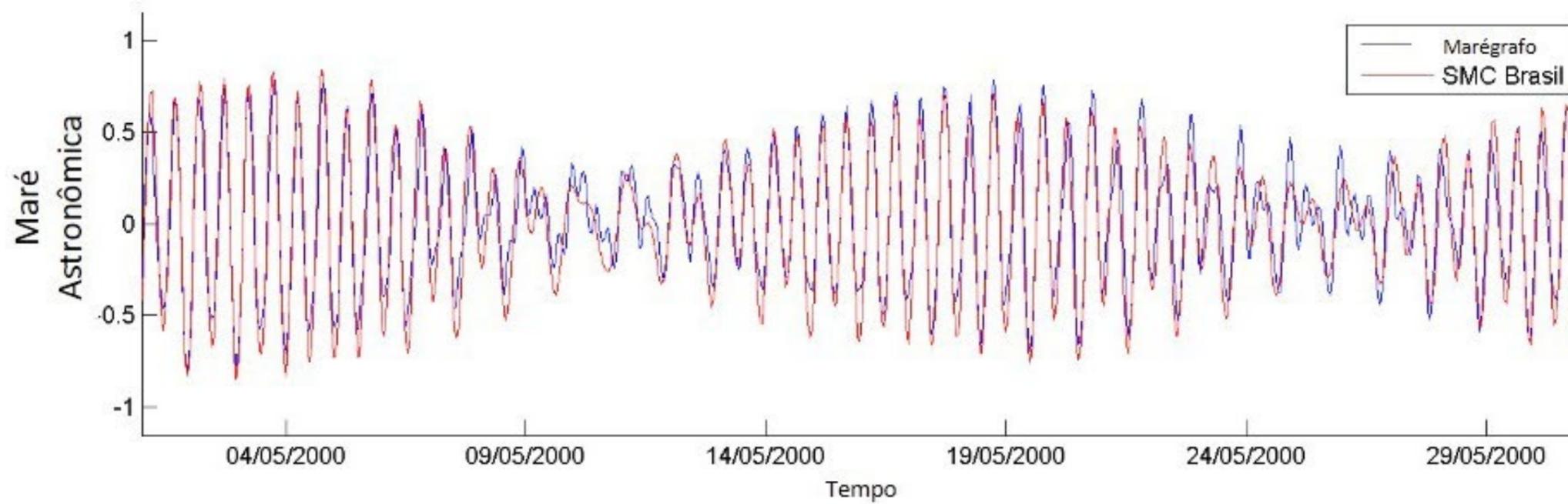
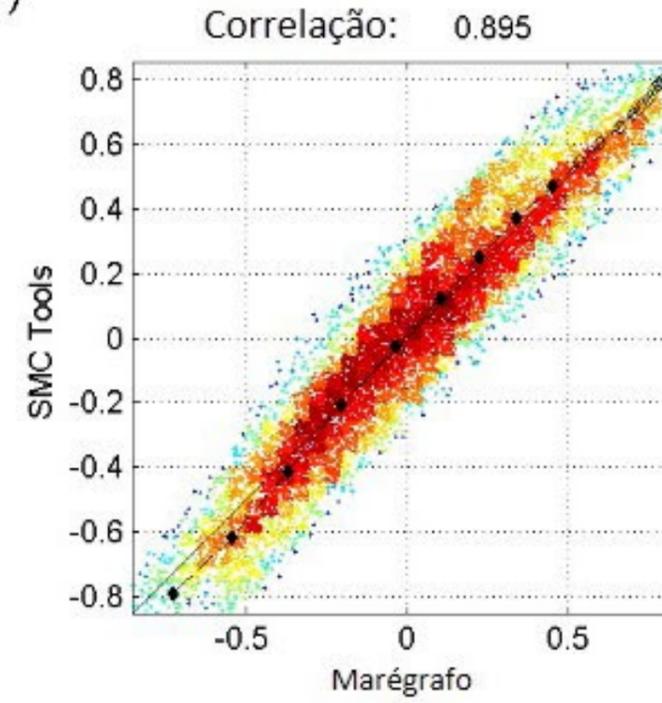
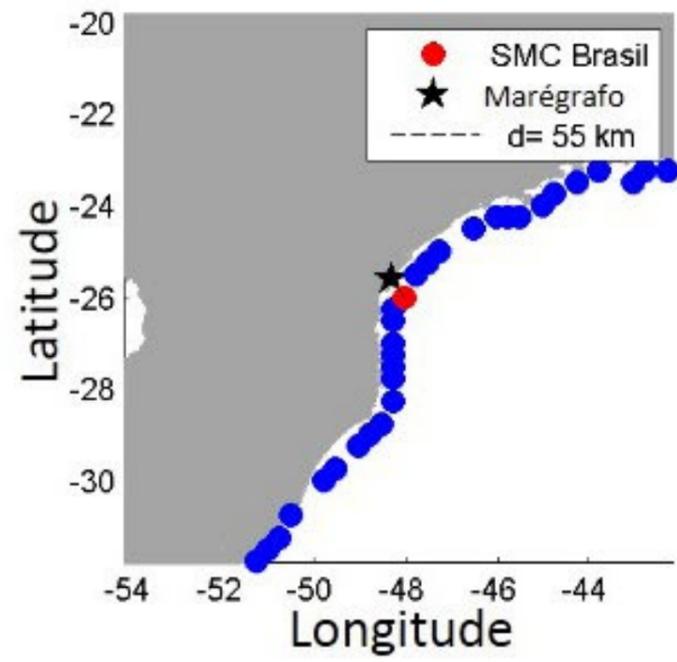


Figura 67: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60135.

Marégrafo: 60139  
(-48.6783, -25.455)

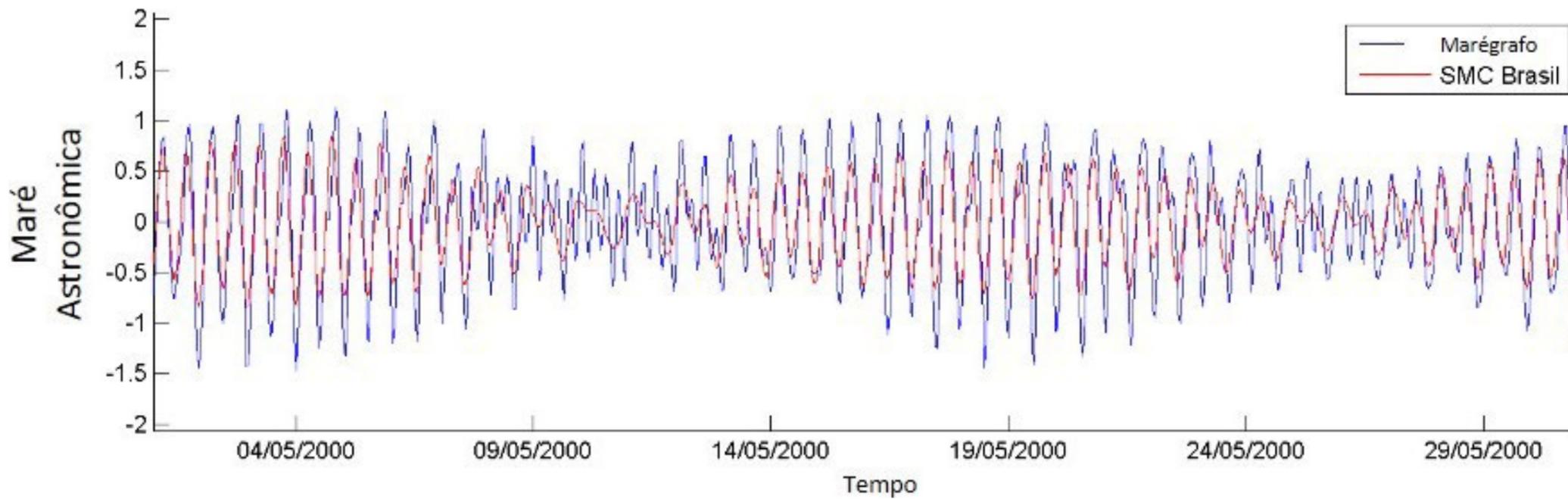
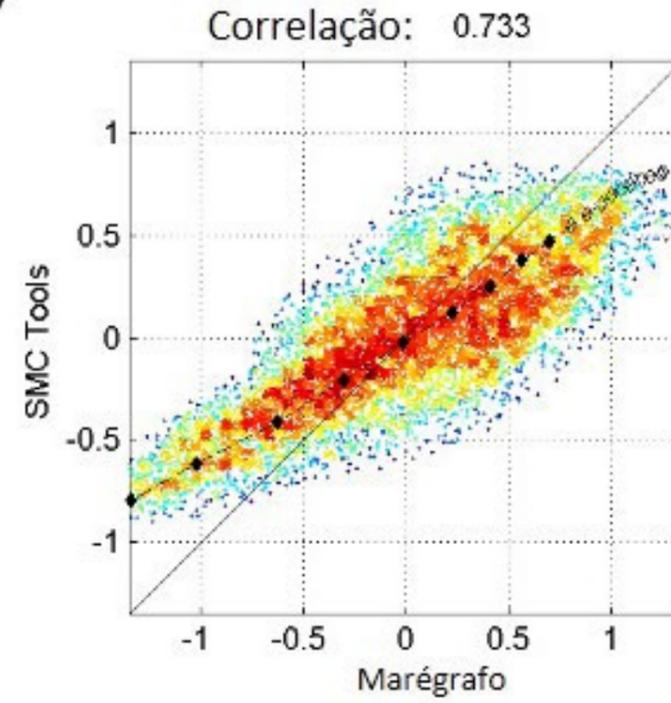
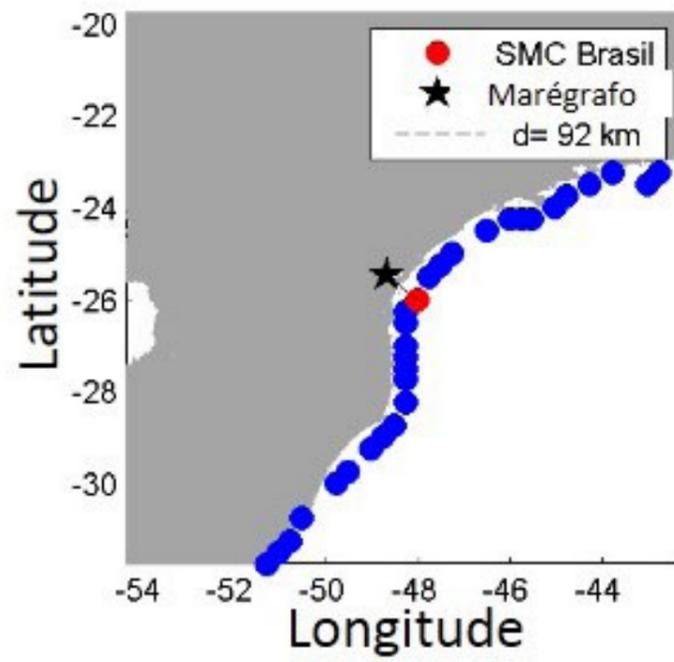


Figura 68: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60139.

Marégrafo: 60250  
(-48.65, -28.23)

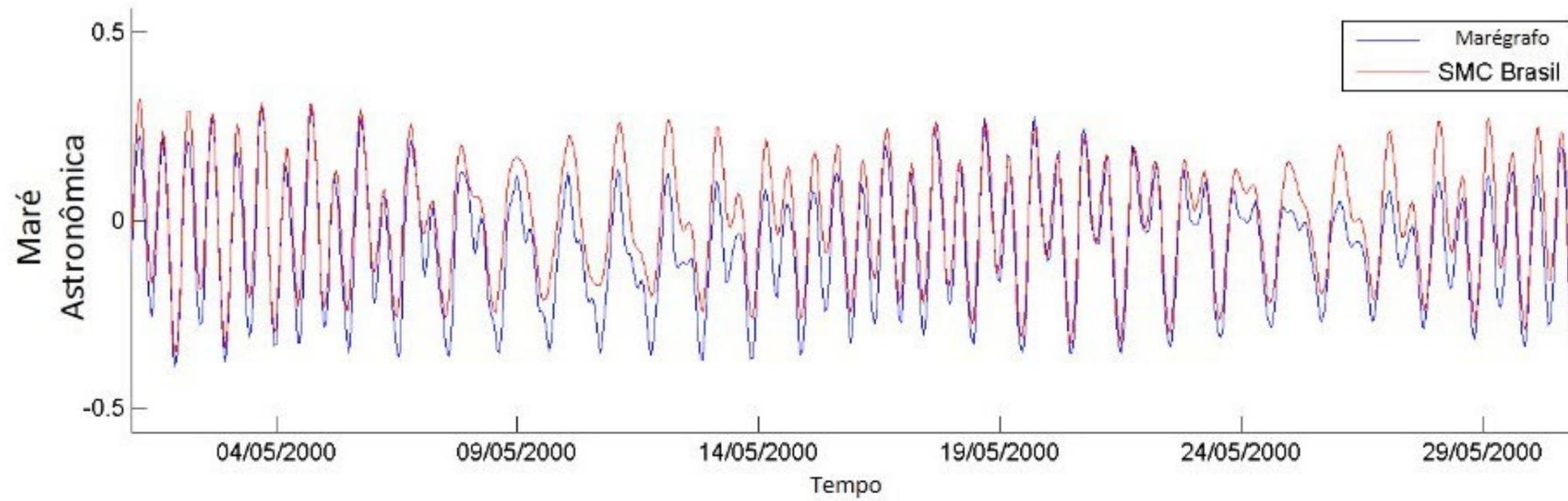
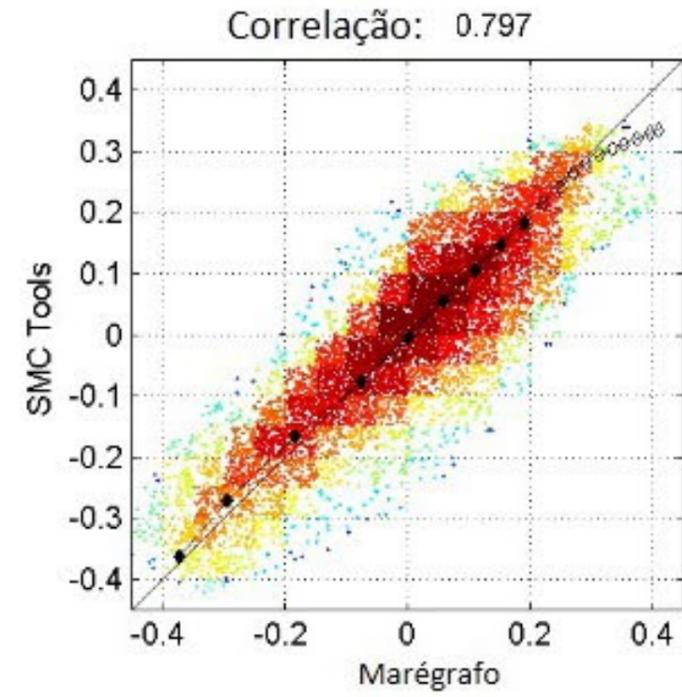
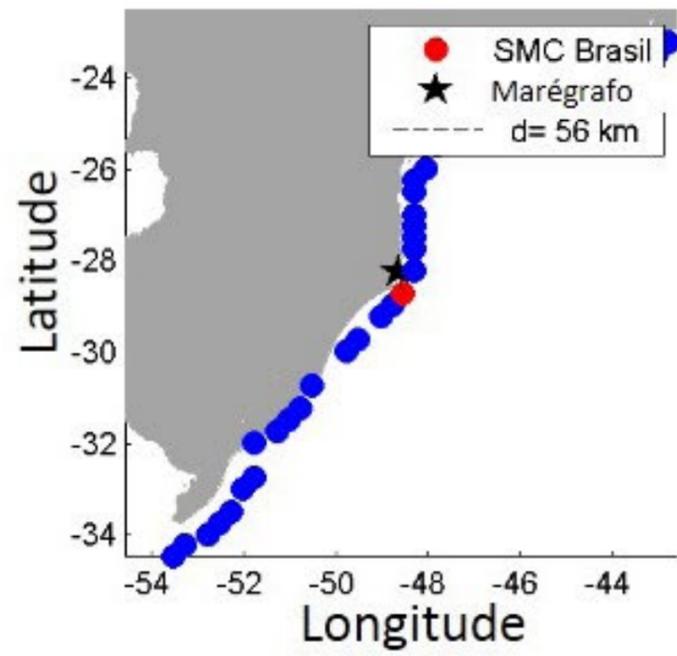


Figura 69: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60250.

Marégrafo: 60370  
(-52.1033, -32.1233)

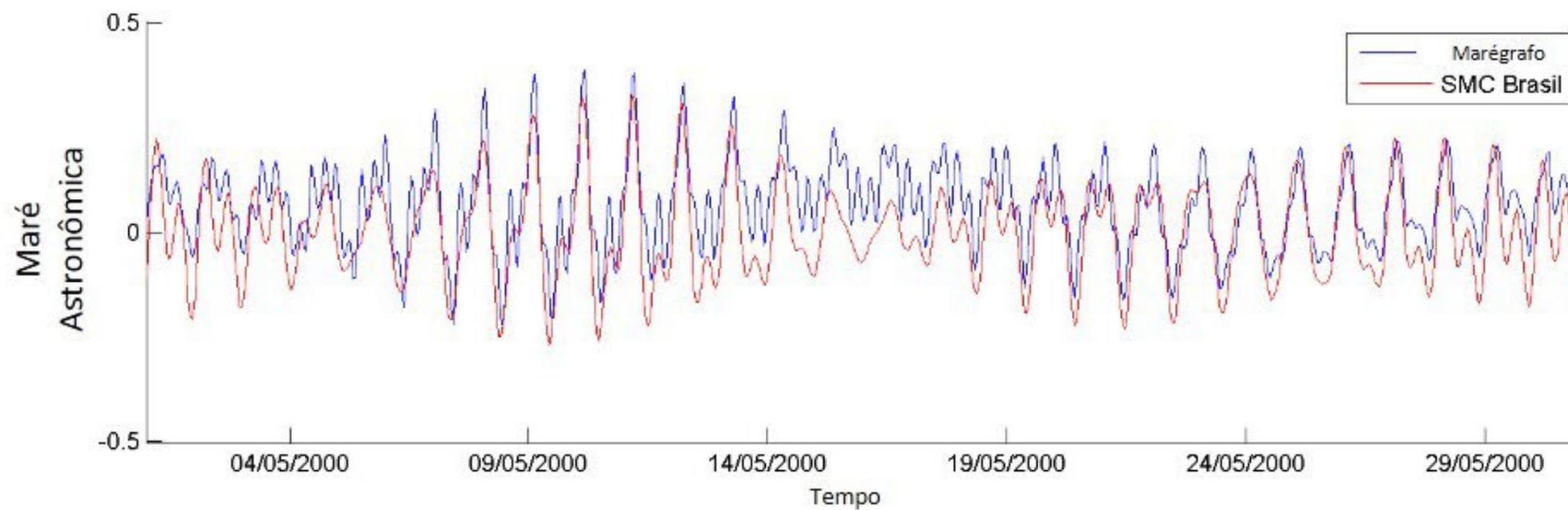
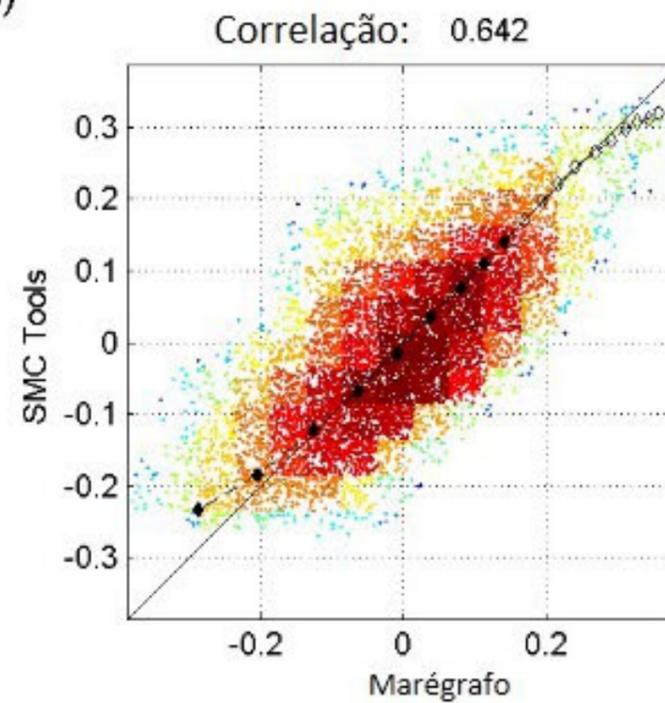
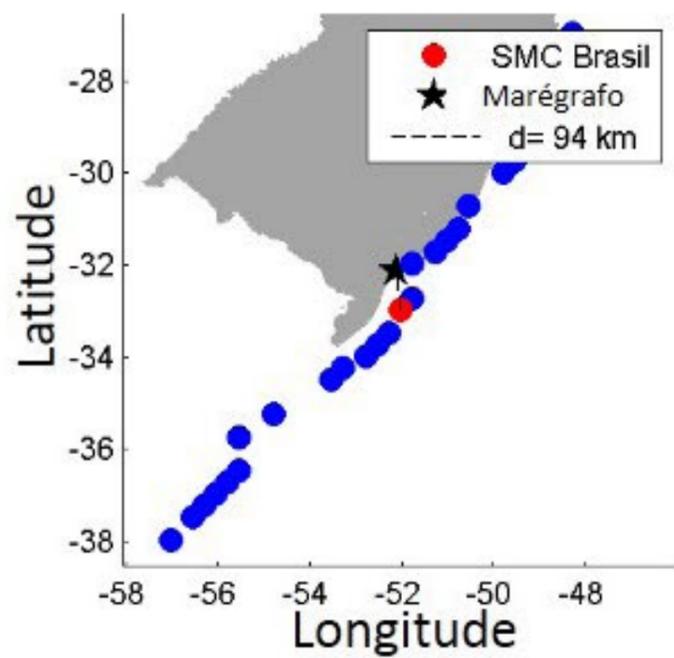


Figura 70: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 60370.

O Quadro 6 mostra os resultados de validação obtidos por cada um dos marégrafos, assim como a distância (em quilômetros) entre o marégrafo e o ponto de reanálise comparado em cada caso.

Quadro 6: Resumo dos indicadores.

Nº Marégrafo	R2	RMSE	BIAS	M	Distância (km)
20520	0,871	0,520	0,00025	0,741	71
30225	0,955	0,179	-0,00020	0,809	58
30337	0,974	0,116	-0,00001	0,928	69
30540	0,979	0,094	0,00013	0,973	45
30725	0,976	0,086	-0,00012	1,015	39
40135	0,920	0,196	0,00024	0,793	75
40140	0,952	0,138	0,00008	0,865	56
40219	0,781	0,217	-0,00044	0,784	72
40252	0,976	0,060	-0,00003	0,928	54
40255	0,963	0,074	0,00066	0,933	54
50116	0,894	0,111	-0,00016	0,917	46
50127	0,864	0,137	0,00053	0,711	78
50141	0,940	0,071	-0,00022	0,909	66
50159	0,900	0,093	0,00132	0,890	57
50165	0,844	0,137	-0,00096	0,763	59
50205	0,943	0,069	0,00034	0,965	42
60132	0,803	0,238	-0,00040	0,678	76
60135	0,895	0,119	-0,00037	1,015	55
60139	0,733	0,350	-0,00018	0,524	92
60250	0,797	0,082	0,00038	0,818	56
60370	0,642	0,091	0,00016	0,669	94

O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) obtido para cada um dos marégrafos mostrados no quadro acima é elevado, com valores próximos de 1, o que indica um correto ajuste dos dados do SMC-Brasil aos dados medidos.

O erro quadrático médio (RMSE) é de uma ou duas ordens menor do que a ordem de grandeza do intervalo de maré de cada ponto. Isto indica uma alta semelhança entre as séries de dados.

Apesar disso o viés estatístico (BIAS) é muito próximo de zero em todos os casos e a inclinação (m) da reta de ajuste adota valores em torno de 1.

### 1.5.2. Marégrafos localizados em mar aberto

Dados medidos por 3 marégrafos localizados em ilhas, longe da costa, são disponibilizados pelo SMC-Brasil. A distância entre estes marégrafos e o ponto da base de dados do SMC-Brasil mais próximo é mostrado no Quadro 7.

**Quadro 7:** Distância entre os marégrafos localizados em mar aberto e o ponto mais próximo da base de dados do SMC-Brasil.

Nº Marégrafo	Distância (km)
10500	920
30950	336
40263	1111

Os marégrafos 10500 e 40263 estão a uma distância de cerca de 1000 km dos pontos da base de dados do SMC-Brasil, sendo estes então, descartados da validação.

O marégrafo 30950 se encontra a uma distância menor, assim a validação de dados de maré astronômica do SMC-Brasil é realizada através do mesmo procedimento descrito para os marégrafos situados na costa.

Os resultados obtidos durante a validação para este marégrafo estão descritos no Quadro 8 e na Figura 71.

**Quadro 8:** Resumo dos indicadores.

Nº Marégrafo	R2	RMSE	BIAS	m	Distância (km)
30950	0,981	0,087	-0,00008	0,989	336

Marégrafo: 30950  
(-32.425, -3.8717)

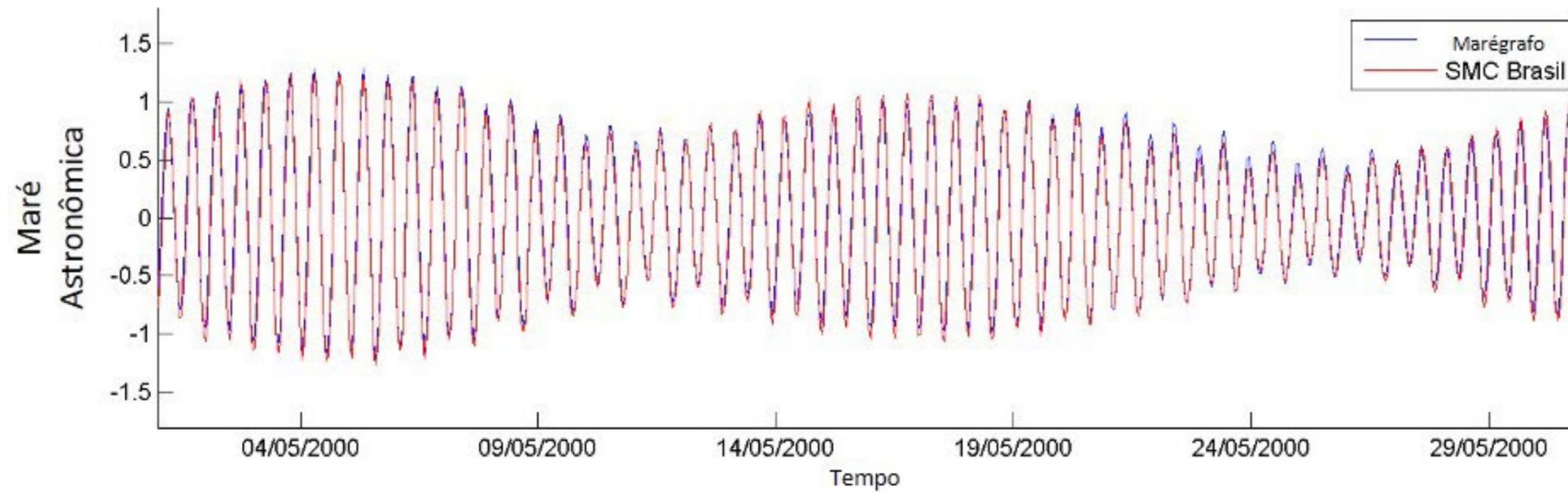
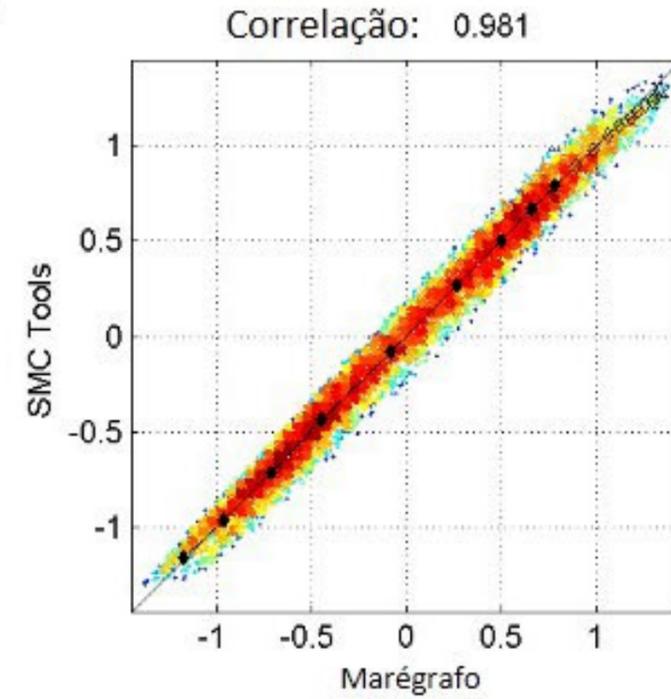
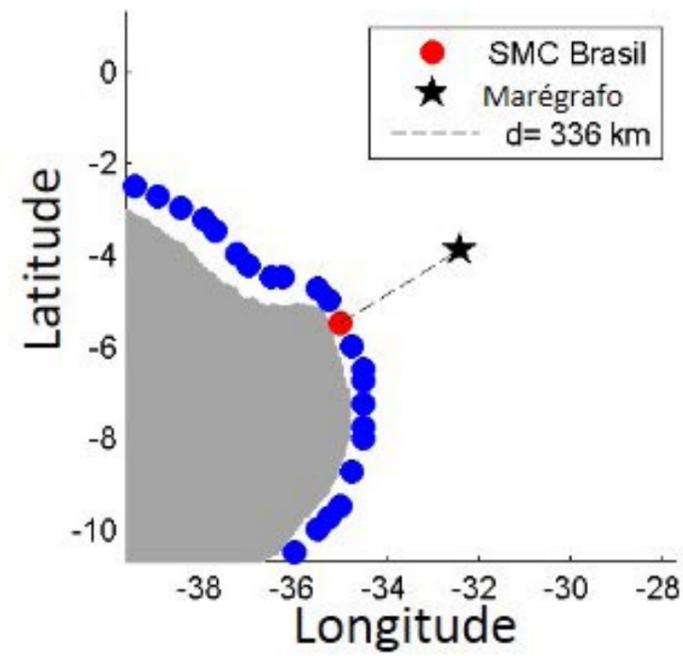


Figura 71: Resultados obtidos durante a validação do marégrafo 30950.

### 1.5.3. Marégrafos localizados em estuários

Os marégrafos localizados dentro de grandes estuários refletem as variações de nível da onda de maré propagada para o interior do mesmo. Quando a onda se propaga dentro de um estuário sofre desfasamento e se deforma em comparação com a onda fora do estuário. Esta propagação de ondas no interior de estuários é complexa e fortemente dependente da sua geometria.

A Figura 72 mostra como alguns dos marégrafos se situam a várias centenas de quilômetros localizados na montante da foz, onde se encontram as séries de dados disponíveis do SMC-Brasil 0

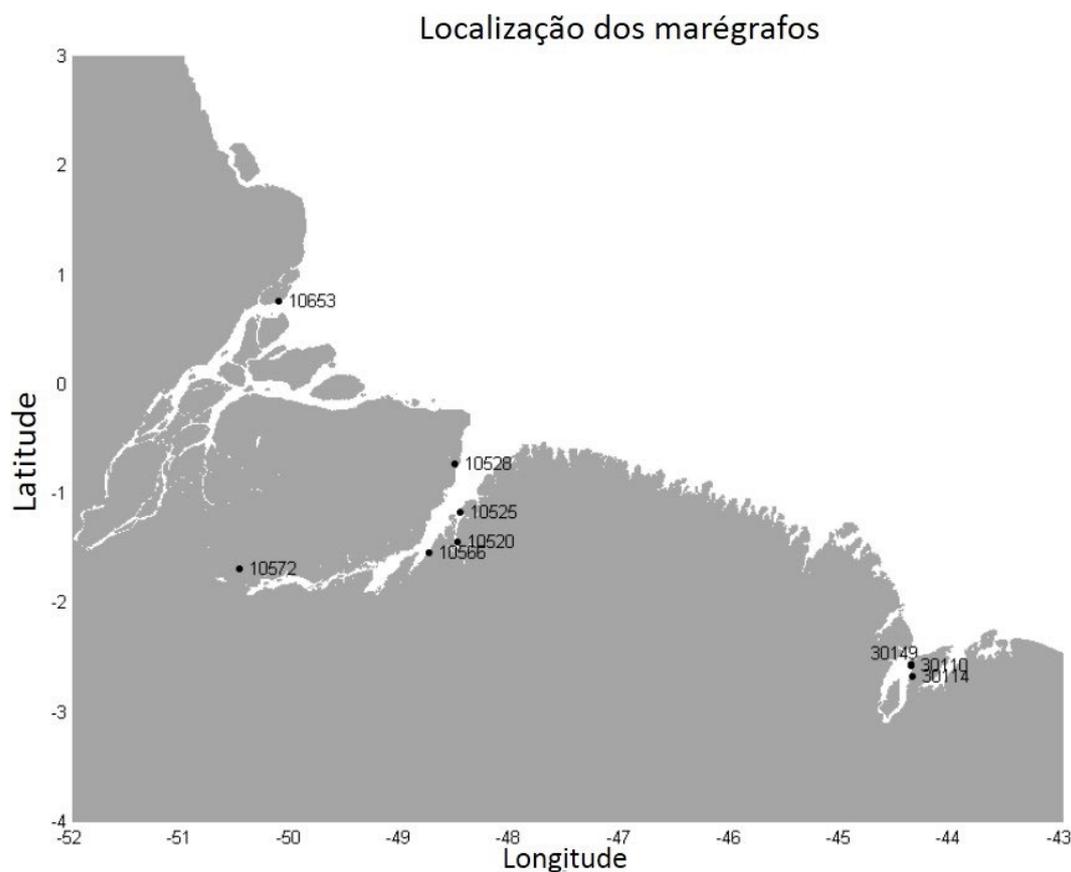


Figura 72: Localização dos marégrafos dentro dos estuários.

Devido à localização desses marégrafos tornou-se necessário realizar um estudo diferente, permitindo a validação dos dados do SMC-Brasil, mediante a comparação dos quantis de ambas séries de dados (marégrafos e base de dados da maré astronômica).

Neste estudo os quantis de 25%, 50%, 95% e 99% são analisados. Para a obtenção de tais quantis, o cálculo da função de distribuição das diferentes série de dados é necessária. Por exemplo, na Figura 73 são vistas as funções de distribuição obtidas para o marégrafo 10653 e o ponto da base de dados do SMC-Brasil mais próximo deste.

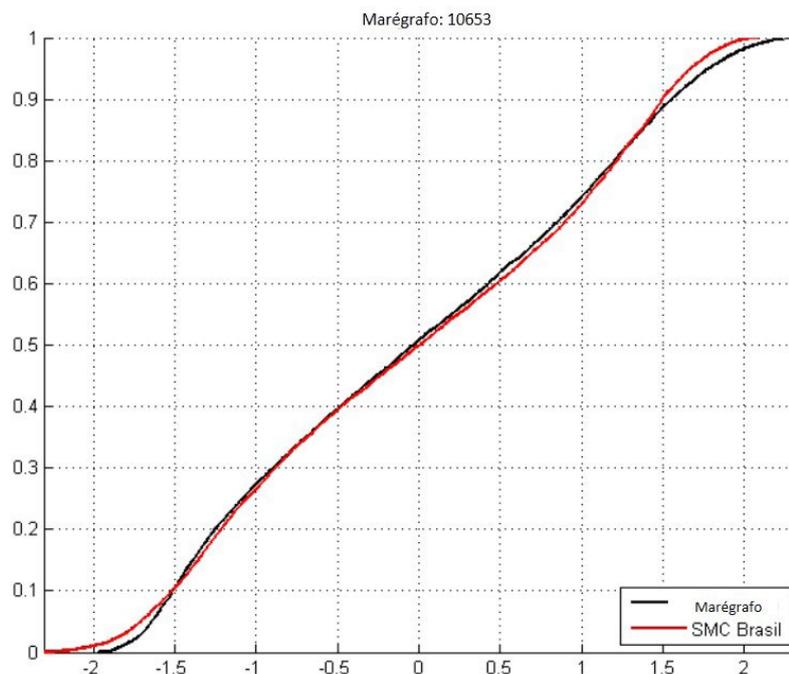


Figura 73: Função de distribuição das séries de níveis de marés astronômicas medidas pelo marégrafo e contidas na base de dados do SMC-Brasil.

A partir destas funções de distribuição, são obtidos os quantis a comparar e que são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9: Resumo dos indicadores.

Nº Marégrafo	Distância (km)	Quantil de 25%		Quantil de 50%		Quantil de 95%		Quantil de 99%	
		Marégrafo	SMC	Marégrafo	SMC	Marégrafo	SMC	Marégrafo	SMC
10520	216	-0,84	-0,71	-0,09	0,00	1,45	1,32	1,68	1,57
10525	190	-0,88	-0,71	-0,09	0,00	1,48	1,32	1,70	1,57
10528	156	-0,97	-0,71	-0,06	0,00	1,61	1,32	1,88	1,57
10566	241	-0,77	-0,71	-0,07	0,00	1,38	1,32	1,61	1,57
10572	391	-0,35	-0,71	0,01	0,00	0,59	1,32	0,69	1,57
10653	93	-1,08	-1,05	-0,03	0,01	1,78	1,67	2,08	1,90
30110	132	-1,54	-0,54	0,07	0,00	2,49	1,22	2,90	1,47
30114	140	-1,52	-0,54	0,08	0,00	2,51	1,22	2,89	1,47
30149	132	-1,45	-0,54	0,05	0,00	2,36	1,22	2,71	1,47

No quadro anterior, pode-se ver as séries de dados de níveis de maré astronômica da base de dados do SMC-Brasil, que apresentam quantis muito semelhantes aos obtidos nas séries de dados dos marégrafos 10520, 10525, 10528, 10566 e 10653.

Para executar a validação dos dados do SMC-Brasil nesta zona da costa, não é necessário fazer uma comparação dos dados com cada um dos marégrafos localizados dentro do estuário. Para

um estudo correto, utiliza-se o marégrafo mais externo de cada estuário, uma vez que este é o mais próximo aos pontos da base de dados do SMC-Brasil, que se encontram dispostos ao longo da costa.

Observando a Figura 72 nota-se que os marégrafos mais apropriados para esta validação são o 10528 e 10653, os quais, como mostrado no Quadro 9 mostram quantis muito semelhantes aos obtidos com os dados do SMC-Brasil.

Os resultados obtidos pelos marégrafos 30110, 30114 e 30149 devem ser discutidos separadamente. Estes indicadores estão em uma das margens de um estuário (ver Figura 72). Os três marégrafos estão localizados em pontos muito próximos entre si, a poucos quilômetros um do outro, de modo que suas medições são praticamente idênticas. Nesse estuário ocorrem mudanças significativas na onda de maré, que se deforma e se defaza ao propagar-se na geometria complexa do estuário. Essa forte dependência da geometria e a localização desses marégrafos torna-os inadequados para a validação dos dados do SMC-Brasil, que são representativos de pontos externos à costa.

## 1.6. Conclusões

Neste estudo conclui-se que as séries de dados TOPEX incluídas no SMC-Brasil se ajustam corretamente aos dados de campo medidos por marégrafos ao longo de toda a costa do Brasil.

Esta validação se realizou mediante uma comparação direta dos dados de níveis de maré astronômica incluídos no SMC-Brasil com as séries de maré astronômica prevista com base em dados de 22 marégrafos (67% dos marégrafos).

Cinco outros marégrafos (15% dos marégrafos disponíveis) estão localizados nos estuários, portanto a validação dos dados correspondentes a estes foi realizada mediante outra metodologia, comparando os quantis de ambas as séries de dados.

18% dos dados de marégrafos restantes (6 marégrafos) não foram utilizados para a validação, ou por encontrar-se em pontos muito distantes dos pontos de reanálise disponíveis no SMC-Brasil, ou por localizar-se dentro de estuários onde o deslocamento e deformação da onda de maré astronômica é muito importante, por isso não são adequados para validar as séries de dados.

Após isso, conclui-se que a base de dados SMC-Brasil fica corretamente validada, tendo obtido um correto ajuste entre ambas séries de dados em 82% dos casos, enquanto que 18% dos dados dos marégrafos restantes são considerados inadequados para validação desta base de dados.

## 1.7. Agradecimentos

O IH Cantabria agradece a Marinha do Brasil/DHN pelo fornecimento dos dados da rede de marégrafo do Brasil pela realização deste estudo e validações correspondentes.

## Anexo 2

### METODOLOGIAS DE CÁLCULO DO REGIME EXTREMO

## 2. Metodologia de Cálculo do Regime Extremo

O regime extremo da cota de inundação é um modelo estatístico que descreve a probabilidade com que o nível do mar pode superar a um determinado valor de risco.

Este capítulo apresenta a metodologia seguida para o cálculo do regime extremo da cota de inundação para a costa do Brasil. O método é focado na modelagem da variabilidade anual de uma amostra de valores máximos ajustados a uma distribuição de probabilidade definida heurísticamente, mediante técnicas de ajuste que simplificam o cálculo.

### 2.1. Metodologia de cálculo do regime extremo na costa

#### 2.1.1. Seleção de valores extremos

Antes de modelar os eventos extremos, é necessário determinar uma análise preliminar para a definição dos valores extremos de estudo da cota de inundação. Para definir os eventos extremos e registrá-los deve-se considerar tanto as características da série temporal de estudo como o método de extração. O método mais simples e usado no SMC-Brasil é o método de máximos em um bloco de tempo, que neste documento se denominará método de máximos anuais.

O método de máximos anuais foi escolhido uma vez que se assume que a série da cota de inundação a analisar cobre um período suficientemente longo para representar os eventos extremos que se pretende modelar. Uma característica deste método é que a seleção de um valor por bloco temporal permite a obtenção de uma série de valores extremos contínuos ao longo do tempo, o que facilita a localização de padrões temporais.

Neste método, deve-se considerar o percentual de lacunas em cada unidade de bloco temporal e a dimensão desta janela, sendo aconselhável não usar unidades com lacunas de informação não disponíveis superiores a 40% (MENDEZ *et al.*, 2007).

#### Modelo Estatístico

Uma vez definido o método de seleção dos valores extremos, aplica-se o modelo de extremos. O modelo de extremos eleito para se realizar a aproximação teórica que tem uma relação recíproca com o tipo de valores extremos selecionados é o método da Função Generalizada de Extremos (Generalized Extreme Value, GEV) que faz a análise da magnitude dos valores extremos.

O teorema de Fisher-Tippet mostra que se  $F \in \text{MDA}(G)$ , então  $G$  pertence a alguma das famílias de distribuições que engloba a Função Generalizada de Extremos, GEV. O teorema afirma que se  $Z_n$  converge para uma função de distribuição não-degenerada, a única possível família de distribuições que satisfaz a premissa de que  $F \in \text{MDA}(G)$  é a GEV, classificando todas as distribuições possíveis (não degeneradas) de máximas normalizadas para as variáveis iid (*independent and identically distributed*). A demonstração do teorema pode ser encontrada em Leadbetter *et al.* (1983).

A função de distribuição da GEV pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$G(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} & \text{se } \xi \neq 0 \\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]\right\} & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (28)$$

A função de densidade se define por:

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{\psi} \left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]^{-(1+1/\xi)} + \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} & \text{se } \xi \neq 0 \\ \frac{1}{\psi} \exp\left(-\frac{x - \mu}{\psi}\right) \cdot \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right]\right\} & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (29)$$

onde  $[a]$  + envolve a máxima  $(a, 0)$ ,  $-\infty < \mu < \infty$  é o parâmetro de localização,  $\psi > 0$  é o parâmetro de escala e  $\xi$  é o parâmetro de forma. O parâmetro de localização  $\mu$  representa os valores médios da variável aleatória "x" e especifica a posição da probabilidade de excedência  $\exp(-1)$ . O parâmetro de escala  $\psi$  controla a dispersão da unidade de medida dentro do intervalo da distribuição de forma. Mudanças no parâmetro de escala contraem ou expandem a distribuição ao longo do eixo horizontal. O parâmetro de forma  $\psi$  condiciona um tipo diferente de distribuição, a expressão para  $\xi \neq 0$  engloba duas famílias de distribuição: Fréchet (1927) para o caso de  $\xi > 0$  e Weibull (1939) para o caso de  $\xi < 0$ , enquanto que para o caso  $\xi = 0$  é obtido a partir do limite da equação definida por Fréchet / Weibull, quando  $\xi \rightarrow 0$ , definindo a família de distribuições tipo Gumbel (1958) (MENDEZ *et al.*, 2007).

Os três tipos de famílias apresentados no teorema de Fisher-Tippett têm um comportamento diferente na cauda da função de distribuição (Figura 74), comumente chamadas de caudas limitadas no caso de Weibull, caudas leves no caso de Gumbel e caudas pesadas para Fréchet.

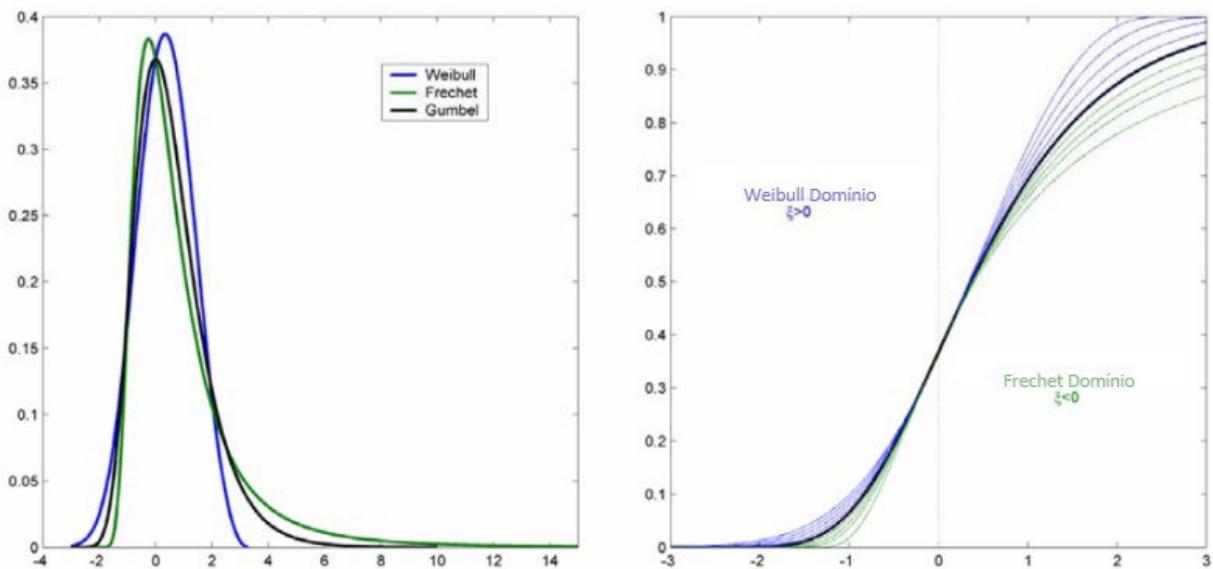


Figura 74: Funções de densidade e distribuição da GEV para diferentes tipos de parâmetros de forma.

Nas primeiras aplicações dessas famílias de distribuição, o comum seria adotar uma das três e, posteriormente estimar seus parâmetros de distribuição. Porém, este procedimento apresenta vários inconvenientes: por um lado a decisão de qual família escolher tem apenas fundamentos descritivos-qualitativos e por outro lado não se pode conhecer a incerteza que envolveu a seleção prévia nos cálculos posteriores de interferência, mesmo em casos onde a suposição feita acarrete um erro considerável. A generalização dos três tipos na expressão da função de distribuição da GEV faz com que, em aplicações reais o comportamento dos valores extremos possa se adaptar a uma categoria mais ampla.

O desenvolvimento proposto é projetado para trabalhar com dados estruturados em blocos de sequências de observação de longitude N, de modo que os valores extremos a serem utilizados para ajustar a GEV será uma série de máximos do bloco. O caso mais comum é a definição dos blocos, de forma que correspondam a um período definido. O bloco de tempo utilizado pelo SMC-Brasil é o máximo anual, como já foi comentado anteriormente, no qual  $n$  será o número de observações durante um ano e  $m$  é o número total de anos disponível (Método dos Máximos Anuais).

### 2.1.2. Método de ajuste do modelo

Definido o modelo estatístico, o próximo passo consiste em se reliaizar o ajuste que permita obter valores estimados dos parâmetros da distribuição teórica, a partir dos valores da amostra. No SMC-Brasil, para se calcular o regime extremo da cota de inundação, foi utilizada a técnica de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation*, MLE).

Assim, utiliza-se a função de densidade conjunta associada a todos os extremos da amostra tomada a partir da função de distribuição GEV, para se obter a expressão da função logarítmica de verossimilhança requerida, que é maximizada para se obter o valores estimados de máxima verossimilhança. Os estimadores de máxima verossimilhança são os valores dos parâmetros que maximizam a probabilidade (verossimilhança), com a restrição de que eles devem estar dentro do chamado espaço parâ métrico ou intervalo de variação natural do parâmetro. Desta forma pode-se obter os estimadores pontuais dos parâmetros constantes da distribuição, como aqueles que maximizam a função de verossimilhança. Se  $\{x_1, \dots, x_n\}$  são N observações de máximas anuais, a função logarítmica de verossimilhança para a família de distribuições GEV é definida como:

$$\ell(X_{MAX}; \mu, \Psi, \xi) = -N \log \Psi - \left( \frac{1}{\xi} + 1 \right) \cdot \sum_{i=1}^N \log \left( 1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\Psi} \right) - \sum_{i=1}^N \left( 1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\Psi} \right)^{-1/\xi} \quad (30)$$

Uma vez que realizado o ajuste pelo MLE, pode-se caracterizar os eventos extremos de cota de inundação em cada um dos pontos distribuídos por toda a área de estudo, bem como a incerteza associada a estes resultados.

### 2.1.3. Períodos de retorno

O período de retorno é o intervalo médio de tempo, geralmente expresso em anos, ao final dos quais um evento se iguala ou se supera, a partir de uma determinada magnitude. Isto é, para um determinado local e variável, se o período de retorno ou intervalo de ocorrência de um evento de determinada magnitude é de 100 anos, significa que a probabilidade de que um evento ocorra em um ano é de 1%. O uso de períodos de retorno e os valores de magnitude associados desempenham

um papel fundamental em projetos de engenharia e em certos fatores relacionados com a gestão do ambiental.

Para modelos baseados nos máximos de um bloco de tempo (GEV) o cálculo dos quantis elevados (valores associados a períodos de retorno anuais) é feito a partir da equação explícita da variável  $x$  na função de distribuição da GEV:

$$X_R = \begin{cases} \mu - \frac{\Psi}{\xi} \left[ 1 - \left\{ -\log \left( 1 - \frac{1}{R} \right) \right\}^{-\xi} \right] & \text{se } \xi \neq 0 \\ \mu - \Psi \log \left\{ -\log \left( 1 - \frac{1}{R} \right) \right\} & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (31)$$

onde  $\xi$ ,  $\psi$  e  $\mu$  são os parâmetros da função de distribuição de GEV e  $R$  é o período de retorno considerado. Se a aproximação matemática para a estimativa de períodos de retorno de pequena magnitude é abordada, o cálculo dos valores dos quantis associados a um período de retorno  $R$  simplifica a expressão:

$$X_R = \begin{cases} \mu - \frac{\Psi}{\xi} \left[ 1 - \left( \frac{1}{R} \right)^{-\xi} \right] & \text{se } \xi \neq 0 \\ \mu - \Psi \log \left( \frac{1}{R} \right) & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (32)$$

onde os parâmetros  $\xi$ ,  $\psi$  e  $\mu$  são os parâmetros da função de distribuição GEV e  $R$  é o período de retorno considerado.

## Anexo 3

### ARTIGOS CIENTÍFICOS DE INTERESSE PARA O DOCUMENTO

#### 3. Artigos Científicos de Interesse para o Documento

Neste anexo se enumeram os artigos científicos cuja leitura é recomendada.

Os artigos incluídos neste anexo são os seguintes:

- ABASCAL, A.J.; CASTANEDO, S.; CID, A.; MEDINA, R. High resolution dynamics downscaling of storm surge in Southern Europe (GOS, Global Ocean Surges). In: GLOSS Group of Experts, 12., 2011, Paris. **Proceedings...** 2011.
- LOSADA, I.J.; REGUERO, B.G.; MÉNDEZ, F.J.; CASTANEDO, S.; ABASCAL, A.J.; MÍNGUEZ, R. Long-term changes in sea-level componentes in Latin America and the Caribbean. **Global and Planetary Change**, v.104, p.34-50, 2013.



## APOIO:



## REALIZAÇÃO:

