

S U M Á R I O :

LISTA DE FIGURAS	iv	
LISTA DE TABELAS	ix	
LISTA DE ABREVIATURAS	xi	
LISTA DE SÍMBOLO	xiv	
RESUMO	xv	
ABSTRACT	xvi	
1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1	
2 - ASPECTOS CONCEITUAIS E HISTÓRICOS		
2.1 .	Introdução	7
2.2 .	Mudanças climáticas e o nível do mar	8
2.3 .	Variações seculares do nível do mar	11
2.4 .	Conceitos de nível do mar	15
2.5 .	Redes de observações maregráficas no mundo	20
2.5.1.	Serviço permanente do nível do mar	20
2.5.2.	Programa GLOSS	20
2.5.3.	Rede Sul-Americana de observações maregráficas	22
2.5.4.	Rede maregráfica de monitoramento do nível do mar no Brasil	23
2.5.5.	Rede maregráfica permanente para geodésia - RMPG	25
2.6 .	Fenômenos que influenciam nas variações do nível do mar	27
2.6.1.	Alterações do efeito estufa	27
2.7	Conseqüências de um aumento do nível do mar	35
2.8	Instituições brasileiras que têm envolvimento em monitorar o nível do mar	38
3 – FUNDAMENTOS DA FORÇA DE MARÉ		
3.1	Introdução	40
3.2	Elementos da maré	41
3.3	Conceito de maré	42
3.3.1	Forças gravitacionais diferenciais	44

3.3.2	Força de maré	46
3.3.3	Movimentos dos astros Lua e Sol em relação à Terra	48
3.3.4	Potencial gerador de maré – PGM	55
3.4	Marés de sizígia e marés de quadraturas	66
3.5	Objetivo do estudo da maré oceânica	68
3.6	Registros maregráficos específicos	71

4 – MARÉGRAFOS - REFERÊNCIAS

4.1	Primeiros equipamentos	74
4.2	Equipamentos atuais	76
4.2.1	Marégrafo de flutuação	76
4.2.2	Marégrafo de ultra-som	78
4.2.3	Marégrafo de pressão ou de fundo oceânico	79
4.3	Referência vertical dos marégrafos	80
4.3.1	Processos físicos e geodinâmicos que afetam as observações maregráficas	83
4.3.1.1	Marés terrestres	83
4.3.1.2	Movimentos tectônicos	84
4.3.1.3	Carga pós-glacial	85
4.3.1.4	Vulcanismo	85
4.3.1.5	Correntes de água subterrâneas	86
4.3.1.6	Ação do homem em locais próximos	86
4.3.1.7	Outros mecanismos	87

5 - MODERNAS TÉCNICAS DE OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS E REDES ASSOCIADAS

5.1	Introdução	88
5.2	Conceitos fundamentais em posicionamento	89
5.2.1	Referencial celeste	92
5.2.2	Referencial terrestre	93
5.3	Sistema GPS – objetivo	95
5.3.1	Introdução	95
5.3.2	Estrutura do sistema	96
5.3.3	Métodos e modelos matemáticos	98
5.3.3.1	Uso do código	98
5.3.3.2	Uso da fase da portadora	100
5.3.4	Erros e correções envolvidos no posicionamento com GPS	101
5.3.4.1	Ionosfera	102
5.3.4.2	Troposfera	102
5.3.4.3	Multicaminhamento	104
5.3.4.4	Perda de ciclos	105
5.3.4.5	Antispoofing (AS)	106
5.3.4.6	Erro do relógio	106
5.3.4.7	Centro de fase da antena	107
5.3.4.8	Marés terrestres	107
5.3.4.9	Cargas dos oceanos	107

5.3.4.10	Carga da atmosfera	108
5.4	Altimetria por satélite	108
5.5	VLBI	115
5.6	Determinação do valor da gravidade	118
5.6.1	Determinação absoluta da gravidade	119
5.6.2	Determinações relativas de “g”	123
5.7	Redes geodésicas	124
6- ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DE CANANÉIA E UBATUBA		
6.1	Introdução	131
6.2	Localização das estações de Cananéia e Ubatuba	132
6.2.1	Base sul IO-USP Cananéia	132
6.2.2	Base norte IO-USP Ubatuba	133
6.3	Marco GPS	135
6.4	Estação gravimétrica Cananéia	137
6.5	Marco de referência para nivelamento geométrico	140
6.6	Observações realizadas	143
6.6.1	Observações maregráficas Cananéia e Ubatuba	143
6.6.2	Observações GPS	146
6.6.3	Observações gravimétricas	148
7 - ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES E RESULTADOS ESPERADOS		
7.1	Introdução	150
7.2	Resultados alcançados	151
7.2.1	Resultado do processamento de dados GPS de Cananéia	151
7.2.2	Observações da maré terrestre	164
7.2.3	Resultado do processamento de dados GPS de Ubatuba	200
7.2.4	Resultado do nivelamento geométrico em Cananéia e Ubatuba	201
7.2.5	Levantamento gravimétrico	204
8 – CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS		
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		211
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA		220
GLOSSÁRIO		226

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.2-1 – Balanço energético da Terra	9
Fig. 2.2-2 – Circulação oceânica	11
Fig. 2.3-1 – Deposição sedimentar	13
Fig. 2.3-1a – Deposição sedimentar	14
Fig. 2.4-1 – Esquema representativo da T.S.O	16
Fig. 2.4.2 – Registros simultâneos de pressão atmosférica, direção dos ventos e nível do mar	18
Fig. 2.4-2a – Variação do nível do mar em Cananéia e Santos	18
Fig. 2.4-2b – Nível diário do mar em Paranaguá e Cananéia	19
Fig. 2.4-3 – Variação do nível médio mensal	19
Fig. 2.5.2-1 – Rede GLOSS	22
Fig. 2.5.4-1 – Estações da RMB, GLOSS e pelágicas	25
Fig. 2.5.5 -1 – R.M.P.G – Rede maregráfica permanente para geodésia	26
Fig. 2.6.1-1 – Emissão de CO ₂ acumulada de 1950 à 1996	28
Fig. 2.6.1-2 – Concentração de CO ₂ desde 1750 à 2000	29
Fig. 2.6.1-3 – Temperatura global	29
Fig. 2.6.1.4.1 – Mar de Weddel Península Antártica	32
Fig. 3.2-1 - Oscilação do nível da água devido as forças de maré	41
Fig. 3.3.1 – Movimento da Lua ao redor da Terra	43
Fig. 3.3.1-1 – Forças gravitacionais entre duas partículas	44

Fig. 3.3.2-1– Forças de maré	46
Fig. 3.3.2-2 – Forças de maré segundo Gemael	47
Fig. 3.3.3-1 – Movimento da Lua em torno do Sol	49
Fig. 3.3.3.2 – Plano equatorial, da eclíptica e órbita lunar	50
Fig. 3.3.4.1 - Potencial da maré	55
Fig. 3.3.4.2 – Posicionamento do marégrafo na superfície	58
Fig. 3.3.4.2a-c – Componentes de ondas de maré	63,64,65
Fig. 3.4.1-1abcd - Maré de água – viva e maré morta	67
Fig. 3.4-2 – Amplitude média da maré no mundo	68
Fig. 3.5-1 - Maregrama registrado em 16 de outubro de 1987 em Brest	69
Fig. 3.5-2 - Propagação de um tsunami	71
Fig. 3.6.1 – Composição da Lua em movimento ao redor da Terra	72
Fig. 3.6-2 – Desigualdade diurna	73
Fig. 4.1-1 - Dispositivo de observação pontual de maré	75
Fig. 4.1.2 – Escala de maré utilizada para referenciar o zero instrumental do marégrafo	75
Fig. 4.1-3 - Fita centimétrica	75
Fig. 4.2.1-1 - Marégrafo de flutuação	77
Fig. 4.2.1-2 - Bloco de registro de marégrafo	77
Fig. 4.2.1-3 – Maregrama	78
Fig. 4.2.2.1 - Marégrafo à ultra – som	79
Fig. 4.2.3.1- Marégrafo de pressão	80
Fig. 4.2.3.1a- Sensor do marégrafo de pressão	80
Fig. 4.3-1 – Gráfico demonstrativo da precisão em função do tempo	81
Fig. 4.3.1.2 – Placas tectônicas	84

Fig. 5.3.1-1 – Constelação GPS	96
Fig. 5.3.4.1.1 – Atraso na ionosfera	102
Fig.5.3.4.2.1 – Atraso na troposfera	103
Fig. 5.3.4.3.1 – Multicaminhamento	104
Fig. 5.3.4.4.1 – Perda de ciclos	105
Fig. 5.4.1 – Evolução das medidas altimétricas	109
Fig. 5.4-2 – Satélite Topex/Poseidon	110
Fig. 5.4-3 - Nível global médio do mar (Topex-Poseidon)	111
Fig. 5.4.4 – Variação do nível do mar e temperatura	111
Fig. 5.4.5 – Alturas das ondas Topex/Poseidon	112
Fig. 5.4.6– Topografia do fundo oceânico	112
Fig. 5.4.7– Satélite altimétrico Jason 1	114
Fig. 5.4.8 – Produtos PATHFIDER (AVHNN)	115
Fig. 5.5-1 – Esquema de observações VLBI	116
Fig. 5.5-2 – Antena VLBI	117
Fig. 5.5-3 – Rede mundial VLBI	118
Fig. 5.6.1-1 – Pêndulo matemático	120
Fig. 5.6.1-2 – Pêndulo físico	120
Fig. 5.6.1-3 – Pêndulo reversível	121
Fig. 5.6.1-4 – Grave em queda livre	122
Fig. 5.6.1-5 – Gravímetro absoluto	123
Fig. 5.7-1- Estações da rede mundial I.G.S	125
Fig. 5.7-2- Estações GPS da rede continental Sul-Americana	126
Fig. 5.7-3 - Rede brasileira de monitoramento contínuo	127

Fig. 5.7-4 - Rede GPS do estado de São Paulo	128
Fig. 6.2.1.1 – Localização esquemática da estação Cananéia	132
Fig. 6.2.1.2 - Estação maregráfica de Cananéia	133
Fig. 6.2.2.1 – Localização esquemática da estação Ubatuba	134
Fig. 6.2.2.2 – Vista panorâmica base norte Ubatuba	134
Fig. 6.3-1 – Rocha tipo matacão	135
Fig. 6.3.2 a – Estação GPS de Cananéia	136
Fig. 6.3.2c - Nova estação GPS Cananéia	136
Fig. 6.3.2-b - Estação GPS de Ubatuba	137
Fig. 6.4-1 – Abrigo para observações gravimétricas de longo período	138
Fig. 6.4-2 – Gravímetro absoluto	138
Fig. 6.4.3 – Gravímetro de registro contínuo	140
Fig. 6.5.1-1 – Operação de nivelamento geométrico	141
Fig. 6.5.1-2 – RN 2813D IBGE	142
Fig. 6.5.1-2 a - Representação esquemática do nivelamento em Cananéia	142
Fig. 6.5.1-2b - Representação esquemática do nivelamento em Ubatuba	143
Fig. 6.6.1-1 – Valores anuais do nível do mar	145
Fig. 6.6.1-a - Registro da maré de Cananéia	146
Fig. 6.6.1- b - Registro da maré de Ubatuba	146
Fig. 6.6.3-1 – Gravímetro LaCoste & Romberg modelo G	148
Fig. 6.6.3.2 – Circuito gravimétrico	149
Fig. 7.2.1-1 – Esquema do ajustamento na estação Cananéia	153
Fig. 7.2.1-2 – Elipse de erros	153
Fig. 7.2.1-3 – Histograma do processamento GPS	153

Fig. 7.2.1-5 – Gráficos da dispersão de altitude em Cananéia	158
Fig. 7.2.1-6 – Processamento GPS Nova Zelândia	159
Fig. 7.2.1-7 - Processamento GPS Inglaterra	159
Fig. 7.2.1-8 - Processamento GPS contínuo	160
Fig. 7.2.1-9 – Dispersão em trono da média – processamento GPS -Cananéia	161
Fig. 7.2.1-9a – Variação da altitude GPS	163
Fig. 7.2.1-10 – Observações GPS horárias	164
Fig. 7.2.2-1 – Representação vetorial da maré terrestre	165
Fig. 7.2.2.-2 – Espectro da maré terrestre	168
Fig. 7.2.2-3 – Espectro da pressão atmosférica	169
Fig. 7.2.2-4 – Perturbação dos dados gravimétricos	170
Fig. 7.2.2-5 – Resíduos dos sinais de marés	177
Fig. 7.2.2-6 - Espectro da maré terrestre	178
Fig. 7.2.2-7 – Espectro da maré terrestre	178
Fig. 7.2.2-8 – Aspecto da curva de maré	179
Fig. 7.2.2-9 – Aspecto da curva da maré sintética	180
Fig. 7.2.2-10 – Vetor B	181
Fig. 7.2.2-11 – Comportamento senoidal do vetor B	181
Fig. 7.2.2-12 – Espectro dos resíduos	182
Fig. 7.2.2-13 – Faixa de amplitude	183
Fig. 7.2.2-14 – Estrutura do sinal GPS	184
Fig. 7.2.2-15 – Espectro do sinal GPS	184
Fig. 7.2.2-16 – Resíduos em torno da media	185
Fig. 7.2.2-17 – Espectro dos resíduos do sinal aplicando filtro 0,8 cpd	185

Fig. 7.2.2-18 – Estrutura do sinal abaixo e acima de 0,8 cpd	186
Fig. 7.2.2-19 – Sinal temporal de pressão	187
Fig. 7.2.2-20 – Espectro do sinal de pressão	187
Fig. 7.2.2-21 – Representação do sinal de pressão filtro de 0,8 Ccpd	188
Fig. 7.2.2-22 – Sinal da maré terrestre	192
Fig. 7.2.2-23 – Espectro do carregamento Schwiderski	193
Fig. 7.2.2-24 - Espectro do carregamento FES	193
Fig. 7.2.2-25 - Espectro do carregamento CSR 3.0	193
Fig. 7.2.2-26 - Espectro do carregamento ORI 96	194
Fig. 7.2.2-27 – Maré oceânica teórica e observada	195
Fig. 7.2.2-28 – Espectro da maré oceânica teórica	195
Fig. 7.2.2-29 – Espectro da maré oceânica observada	196
Fig. 7.2.2-30 – Resíduos MT – MO	196
Fig. 7.2.2-31 – Espectro do vetor Boc	197
Fig. 7.2.2-32 – Vetor Boc com filtro abaixo de 0,8 cpd	197
Fig. 7.2.2-33 – Comparação do vetor Boc com o vetor do sinal GPS	198
Fig. 7.2.4-1 – Plano de referência do nivelamento - Cananéia	202a
Fig. 7.2.4-2 – Plano de referência do nivelamento - Ubatuba	202b
Fig. 7.2.4-3 – Levantamento planialtimétrico Cananéia	203a
Fig. 7.2.4-4 – Operação de nivelamento geométrico	204
Fig. 7.2.5-1 – Gravímetro Lacoste&Romberg modelo G	204
Fig. 7.2.5-2 – Circuito gravimétrico	205

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Composição dos gases da atmosfera	2
TABELA 2.3-1 – Eras geológicas	12
TABELA 2.7-1 – Portos do Brasil: maré máxima e estruturas	38
TABELA 3.3.4.1 – Ondas do espectro das marés	60
TABELA 5.7.2-1 – Equivalência das unidades	124
TABELA 5.8-1 – Coordenadas geodésicas sistema SAD-69	125
TABELA 5.8-2 – Coordenadas geodésicas sistema WGS-84	126
TABELA 6.6.2-1 – Observações GPS marco de Cananéia	147
TABELA 6.6.2-2 – Observações GPS marco de Ubatuba	147
TABELA 7.2.1-1 – Saída do processamento GPS	152
TABELA 7.2.1-2 – Resultado da média da 4 campanhas GPS – Cananéia	154
TABELA 7.2.1-3 – Média segunda campanha Camp.02/01	158
TABELA 7.2.1-5 – Processamento Camp.02/cont.	160
TABELA 7.2.1-5a – Valores de altitudes atualizados a uma referência única	162
TABELA 7.2.2-1 – Exemplo arquivo de maré terrestre	168
TABELA 7.2.2-2 – Parâmetros da maré teórica	172
TABELA 7.2.2-3 – Análise da maré – ETERNA	173
TABELA 7.2.2-4 – Análise de maré 1ICET	173
TABELA 7.2.2-5 – Análise de maré 2 ICET	174
TABELA 7.2.2-6 – Análise do carregamento oceânico ETERNA	174

TABELA 7.2.2-7 – Análise do carregamento oceânico Vendikov	175
TABELA 7.2.2-8 – Análise de maré ETERNA	176
TABELA 7.2.2-9 – Parâmetros da maré sintética	180
TABELA 7.2.2-10 – Correlações com o sinal GPS	188
TABELA 7.2.2-11 – Análise de maré ETERNA	189
TABELA 7.2.2-12 – Amplitude das componentes de ondas	190
TABELA 7.2.2-13 – Carregamento oceânico	190
TABELA 7.2.2-14 – Parâmetros de carregamento modelo SCW80	191
TABELA 7.2.2-15 – Parâmetros de carregamento modelo FES90	191
TABELA 7.2.2-16 – Parâmetros de carregamento modelo CSR3.0	191
TABELA 7.2.2-17 – Parâmetros de carregamento modelo ORI96	192
TABELA 7.2.2-18 – Correlações do vetor x com sinal GPS	194
TABELA 7.2.2-19 – Correlações do com sinal GPS x maré oceânica	196
TABELA 7.2.2-20 – Correlações do com sinal GPS x maré oceânica	198
TABELA 7.2.2-21 – Resumo das correlações	199
TABELA 7.2.3-1 – Resumo dos resultados do processamento GPS Ubatuba	201
TABELA 7.2.4-3 – Diferenças de nível em relação ao plano de referência Ubatuba e Cananéia	203a
TABELA 7.2.5-1 – Resultado da campanha gravimétrica	205a
TABELA 7.2.5-2 – Resultado da campanha gravimétrica	205b

LISTA DE ABREVIATURAS

ABO - Associação Brasileira de Oceanografia

CEC - Comissão de Engenharia Costeira

CIGNET – Cooperative International GPS Network

CHM. – Centro de Hidrografia da Marinha

COI - Comissão Oceanográfica Intergovernamental

cpd – Ciclos Por Dia

CPRM - Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais

CTP - Conventional Terrestrial Pole

CVRD - Companhia Vale do Rio Doce

DEGED - Departamento de Geodésia

DNAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

EPUSP - Escola Politécnica da USP

ESA - European Space Agency

FURNAS - Centrais Elétricas S/A

GLOSS – The Global Sea Level Observing System

GPS - Global Positioning System

IAG-USP - Instituto Astronômico e Geofísico

IAG - International Association of Geodesy

IAU - International Astronomical Union

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IERS - **I**nternational **E**arth **R**otation **S**ervice

IGS - **I**nternational **G**PS **S**ervice

IME - **I**nstituto **M**ilitar de **E**ngenharia

INPE - **I**nstituto **N**acional de **P**esquisas **E**spaciais

INTERNET - Rede de comunicação mundial composta de diversas redes

ITRF - IERS **T**errestrial **R**eference **F**rame

IUGG - **I**nternational **U**nion of **G**eodesy and **G**eophysics

NASA - **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration

MO - **M**aré **O**ceância

NAVSTAR - **N**avigation **S**atellite with **T**iming and **R**anging

NGS - **N**ational **G**eodetic **S**urvey

NIMA - **N**ational **I**magery and **M**apping **A**gency

NOAA - **N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration

NODC - **N**ational **O**ceanographic **D**ata **C**enter

ON - **O**bservatório **N**acional

P - **P**recision code

PSMSL - **P**ermanent **S**ervice for **M**ean **S**ea **L**evel

PTR - **D**epartamento de **E**ngenharia de **T**ransporte

SA - **S**elective **A**vailability

SAD -69 - **S**outh **A**merican **D**atum 1969

SIO - **S**cripps **I**nstitution of **O**ceanography

SLR - **S**atellite **L**aser **R**anging

SPU - **S**erviço de **P**atrimônio da **U**nião

TOGA - **T**ropical **O**cean **G**lobal **A**tmosphere

UERJ – **U**niversidade **E**stadual do **R**io de **J**aneiro

UNIVALE - **U**niversidade do **V**ale do Itajaí

USP - **U**niversidade de **S**ão **P**aulo.

VLBI - **V**ery **L**ong **B**aseline **I**nterferometry

WGS - **W**orld **G**eodetic **S**ystem

LISTA DE SÍMBOLOS

θ = latitude geodésica

λ = longitude geodésica

g = gravidade terrestre

h = altitude geométrica

Z_0 = nível médio, referido ao zero da carta

A_i = constante harmônica (amplitude)

G_i = constante harmônica (situação da onda em relação a Greenwich)

q_i = velocidade angular da onda elementar

V_{oi} = argumento astronômico

N = ondulação geoidal

H = altitude ortométrica

f = achatamento do elipsóide

A_g = azimute geodésico

a = semi-eixo maior do elipsóide

b = semi-eixo menor do elipsóide

TX, TY, TZ = parâmetros de translação

M_h = massa total do pêndulo

I = momento de inércia

$t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ = instantes de um grave em queda livre

$Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ = posições de um grave em queda livre

RESUMO

O aumento do nível médio dos mares verificado no último século, fruto do aquecimento global do planeta e do derretimento das calotas polares, entre outros fatores, tem determinado um grande interesse em todo o mundo pelo seu monitoramento. Para isso, é importante o emprego de tecnologias distintas que permitam distinguir os movimentos da crosta das variações do nível do mar. Neste sentido, o GPS, o VLBI e a gravimetria de precisão associadas ao nivelamento geométrico complementam as observações maregráficas. O presente trabalho se propõe a fazer uma revisão dos aspectos históricos de variações do nível do mar e das técnicas modernas de posicionamento e de monitoramento de variações da crosta terrestre. Em termos práticos, restringiu-se as observações e as análises às estações de Cananéia e Ubatuba, onde foram realizadas observações GPS, gravimétricas e nivelamento geométrico, além dos registros maregráficos existentes há várias décadas.

ABSTRACT

The increase of the mean sea level verified in the last century, consequence of the global heating of the planet and the polar melting of calottes, among other factors, has originated a great interest in the whole world for its monitoring. For this purpose, it is necessary the use of advanced technology such as: GPS, VLBI, gravimeter of high accuracy associated with the geometric leveling, out of tide gauge records. The accuracy of the results will depend on the adoption of an adequate reference system. The present work is restricted, in practical terms, to the tide gauges of Cananéia and Ubatuba maintained by the Oceanographic Institute of USP, where GPS as well as gravity observations have been carried out recently out of many decades of tide gauge records.