

ROBERTO TEIXEIRA LUZ

**ESTRATÉGIAS PARA MODERNIZAÇÃO DA COMPONENTE VERTICAL DO
SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO E SUA INTEGRAÇÃO AO SIRGAS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

**Orientador: Prof. Dr. Sílvio Rogério
Correia de Freitas**

Co-Orientador: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Heck

CURITIBA

2008

L979 Luz, Roberto Teixeira
Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS / Roberto Teixeira Luz – Curitiba, 2008.
207 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Sílvio Rogério Correia de Freitas.
Co-Orientador: Bernhard Heck.

Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.
Inclui Bibliografia.

1. Geodésia. 2. Posicionamento vertical. I. Freitas, Sílvio Rogério Correia de. II. Heck, Bernhard. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDD 526

TERMO DE APROVAÇÃO

ROBERTO TEIXEIRA LUZ


"ESTRATÉGIAS PARA MODERNIZAÇÃO DA COMPONENTE VERTICAL DO SISTEMA
GEODÉSICO BRASILEIRO E SUA INTEGRAÇÃO AO SIRGAS"

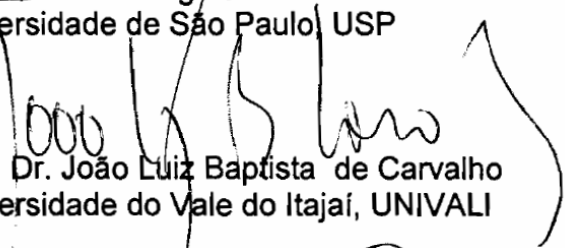
Tese nº 59 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

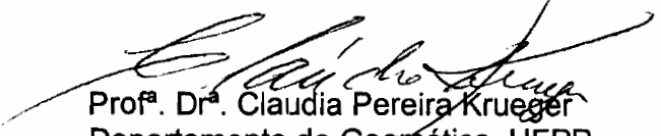

Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Bernhard Heck
Universidade de Karlsruhe, Alemanha


Prof. Dr. Nelsi Côgo de Sá
Universidade de São Paulo, USP


Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho
Universidade do Vale do Itajaí, UNIVALI


Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Claudia Pereira Krueger
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 14 de março de 2008.

AGRADECIMENTOS

*“(...) Refrigera a minha alma; (...) o meu cálice transborda.
(...) Certamente Sua bondade e misericórdia me seguirão
por todos os dias da minha vida; e habitarei a casa do
Senhor por longos dias.” (Sl 23)*

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao seu Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), e seus Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS), Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) e Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE).

À Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através de suas Diretoria de Geociências (DGC) e Coordenação de Geodésia (CGED, ex-DEGED, ex-SUDEG), pela licença de doutoramento (Processo 03602.000285/ 2003-49) e pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa (Processo 140084/2004-5) que viabilizou meus quatro anos no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

À CAPES e ao DAAD, pelo auxílio financeiro (Processo BEX-0297/06-2, PROBRAL) que tornou possível o estágio de oito meses em Karlsruhe, Alemanha.

Ao Instituto de Geodésia (GIK, *Geodätisches Institut Karlsruhe*) da Universidade de Karlsruhe, na Alemanha, pela generosa acolhida e permanente atenção desde 2004.

Ao Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas (DGFI, *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*), em Munique, pelas curtas porém calorosas acolhidas desde 2000, e pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

À Associação Internacional de Geodésia (IAG), pelo apoio à participação em diversos eventos internacionais.

À Companhia Docas de Imbituba (CDI), pela colaboração na implantação, operação, manutenção e controle geodésico da estação da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) em Imbituba.

Ao Prof. Dr. Nelsi Côgo de Sá, do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP), pela atenção, gentileza e contribuições desde o início destes estudos (Seminários II e III).

Ao Prof. Dr. Denizar Blitzkow, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP), pela cessão dos dados da Sub-Comissão da IAG para Gravidade e Geóide na América do Sul (SCGGSA), e pelo apoio atencioso.

Ao Dr. Jürgen Müller e à Dra. Karen Insa Wolf, do *Institut für Erdmessung* (IfE) da *Leibniz Universität Hannover*, pela atenção, interesse e gentileza no mini-curso de Geodésia Física em Curitiba, na visita a Hannover e nos Simpósios da IAG.

Ao Dr. Günter Schmitt, do GIK/Uni-Karlsruhe, pela atenção e gentileza nos mini-cursos de Ajustamento em Curitiba e durante o estágio em Karlsruhe.

Ao Dr. Jaakko Mäkinen, pela atenção e cordialidade nas respostas às consultas sobre o tema da maré permanente.

Aos Professores Dr. Jucilei Cordini e Cláudio Zimmermann, da UFSC, pelo apoio nas operações em Imbituba.

Às seguintes Gerências de Geodésia e Cartografia (GGC) estaduais do IBGE, pela atenção e apoio dispensados a mim muito antes da idéia do Doutorado, e que acabaram resultando essenciais aos estudos desenvolvidos nesta Tese:

- à Unidade Estadual do IBGE em Santa Catarina (UE-SC) e à sua GGC, pelo apoio nas operações em Imbituba;
- às Unidades Estaduais do IBGE no Pará e no Amapá, pelo apoio nas operações referentes à estação da RMPG em Santana;
- à Unidade Estadual do IBGE na Bahia (UE-BA) e à sua GGC, pelo apoio na implantação, operação, manutenção e controle geodésico da estação da RMPG em Salvador, e pelos esforços de aprimoramento da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do SGB e de densificação gravimétrica do Território Brasileiro;

- à Unidade Estadual do IBGE no Ceará (UE-CE) e à sua GGC, pelo apoio no planejamento da estação da RMPG em Fortaleza, bem como por seus esforços seculares de estabelecimento e aprimoramento da RAAP/SGB e de densificação gravimétrica do Território Brasileiro;
- à Unidade Estadual do IBGE em Goiás (UE-GO) e à sua GGC, pelos esforços de estabelecimento e aprimoramento da RAAP/SGB e de densificação gravimétrica no Brasil e na América do Sul; e
- à Unidade Estadual do IBGE no Distrito Federal (UE-DF) e à sua GGC, pelos esforços de estabelecimento e aprimoramento da RAAP/SGB e de densificação gravimétrica do Território Brasileiro, e especialmente pela criteriosa implantação da sub-rede “Nortesul”.

À Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica (AECO) da COPPE/UFRJ, pelo apoio na concepção, estabelecimento e operação da RMPG.

À Marinha do Brasil e seus Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e Instituto de Estudos do Mar “Almirante Paulo Moreira” (IEAPM), pelo apoio na concepção e estabelecimento da RMPG.

Ao Instituto de Pesquisas Hidroviárias (InPH), pelo apoio na concepção e estabelecimento da RMPG.

À Unidade de Geodésia da Petrobras, pelo apoio na estação da RMPG em Macaé.

Ao Alexandre Dias, da Squitter, cujo apoio no estabelecimento da RMPG superou em muito os limites impostos pelo compromisso comercial.

Aos funcionários do IBGE cuja atenção e gentileza contribuíram para a normalidade do processo de afastamento: Luiz Antonio de Moraes, Maria das Graças Muniz, e Denise Britz Silva.

Aos Professores e Secretária do CPGCG.

Ao Eng. Cândido e ao Sérgio, da CDI, pela atenção e gentileza com que sempre me receberam em Imbituba.

À Cmdte. Ana Claudia, pelo apoio e amizade.

Aos amigos que me acolheram no GIK, ajudando a enfrentar a distância e as barreiras: Franziska Wild-Pfeiffer, Kurt Seitz, Michael Mayer, Malte Westerhaus, Marco Benner, Olaf Dierks, Klaus Lindner, Xiaoguang Luo, Andreas Knöpfler, Magda Kästel, Günter Schmitt, e Hans-Peter Bähr (IPF). A atenção constante de Diana Bracko e de Barbara e Bernhard Heck foi especialmente confortadora.

Aos amigos que me receberam no DGFI: Ilona Schreiber, Barbara Meisel, Laura Sanchez, Roman Savcenko, Detlef Angermann e Alfred Klepaczko. A atenção dada por Wolfgang Bosch e Hermann Drewes foram especialmente importantes, assim como o carinho de Steffi e Wolfgang Seemüller.

Não tenho palavras que façam justiça à importância do carinho e atenção que recebi, na Alemanha, de: Ana Lucia (Gonçalves) Münzner, Steffen Münzner, Tatjana Cvetek, Wagner Muniz, Diana Weihing, Peter Lama, Juilson Jubanski, Mauro Alixandrini, Simone Hübener, e Christian Pitz.

Às pessoas que suportaram a mim, à minha família e aos meus estudos em Curitiba, muitas vezes sem a devida retribuição. Sua importância independe da ordem de citação: Sílvia Andolfato, Juan Báez, Michele Beppler, Mosar Botelho, Dulce Bueno, Angela Cararo, Regiane Dalazoana, Luciene Delazari, Vagner Ferreira, Roberto França, Jaime Freiburger Jr., Raul Friedmann, Rafael Genro, Daniel Goldani, Karoline Jamur, Karoline Koop, Claudia Krueger, Sandro Lima, Jussara Macedo, Fabiani Miranda, Franciely Miranda, Edson Mitishita, Juliana Moulin, Alessandra Palmeiro, Sílvia Salustiano.

Aos amigos do IBGE, pelo carinho, apoio e compreensão: Roberto Rainho, Valéria Guimarães, Ricardo Ribas, Antonio Castro, Hildeberto Lins, Sonia Costa, Cristina Lobianco, Edimilson Silva, Antonio Carvalho, Jose Duarte, Sylvio Pinho, Wagner Carrupt, Claudia Callado, Cláudia Assumpção, Renato Pinheiro, Gina Borges, Carlos Castro Júnior, Sílvia Potier, Verônica Magalhães, Edson Flosino, Antonio Carlos Rodrigues, Rosa Alice, Olmes Paes, Nilo Silva, Walter Subiza Pina, Ericka Delania, Antonio Lucio, JC Mata da Rocha, Ernesto, Clayton, Miraci, Écio.

Aos amigos Beth Moraes, Edu Marcel, Fernando Aliani e Sílvia Maria, cariocas igualmente transplantados para Curitiba!!!

Às minhas famílias: Rogério, Fabi, Rodrigo, Regina, Bruna, Bárbara, Pedrinho, Alice, Carlos, Maria, Marlene, Paulo, Mariana, Gabriel, Paulette, Júnior, Dinah, Fernando.

Aos meus Pai e Mãe, Izaías e Ruth, pelos sacrifícios e pelo azimute moral.

Ao Prof. Dr. Claudio Neves, pelo apoio, incentivo e visão sistêmica!

Ao Pesquisador do DGFI, Dr. Wolfgang Bosch, e ao seu Diretor Hon.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Drewes, pela atenção e colaboração.

Ao meu Co-Orientador, Diretor do GIK, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Heck, pela extrema gentileza e cordialidade com que conduziu nossos contatos mesmo antes do estágio em Karlsruhe, e pela atenção e estímulo permanentes.

Ao meu amigo e orientador, Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas, pelo respeito, confiança, estímulo, presença e apoio, desde sempre, e especialmente ao longo desses quatro anos. À sua família, pela compreensão.

À Minha Wânia.

RESUMO

São analisadas alternativas para a melhoria do significado físico das altitudes do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) mediante a obtenção de valores de gravidade e número geopotencial das estações (RRNN) da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). Discute-se também a incorporação de dados de Altimetria por Satélites (ALTSAT) e da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) para avaliação daqueles procedimentos e conexão dos referenciais verticais da RAAP e da América do Sul. Os dados de gravimetria e nivelamento do IBGE foram analisados sob o ponto de vista das dificuldades de sua integração para o cálculo das respectivas diferenças de geopotencial. Foi identificado um conjunto de linhas recentes da RAAP em que praticamente todas as RRNN dispõem de informação gravimétrica direta e homogênea. Foi desenvolvido um programa computacional específico para a integração das informações de gravidade aos dados de nivelamento e a montagem da rede de diferenças internodais de geopotencial. Com as informações desta sub-rede da RAAP, foi possível simular diferentes cenários de ausência de dados de gravidade em RRNN, avaliando os valores interpolados via colocação por mínimos quadrados pelo programa computacional fornecido pelo Projeto SIRGAS. Os testes indicaram que esse programa superestima a qualidade da interpolação, principalmente nos casos mais gerais de distribuição desfavorável dos valores de referência. Foi discutida a influência das heterogeneidades espaciais e temporais no ajustamento das diferenças internodais de geopotencial. Para tanto, foram analisados os efeitos do particionamento adotado no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (AAGP) da RAAP, no qual o IBGE calculou as altitudes existentes atualmente no seu Banco de Dados Geodésicos (BDG). O ajustamento simultâneo da mesma rede originalmente particionada no AAGP evidenciou distorções excessivas nos valores de altitude e corrigiu um problema decorrente da heterogeneidade da RAAP nas imediações de Imbituba. Essa avaliação parcial do AAGP forneceu subsídios para a montagem de uma sub-rede da RAAP conectando três estações da RMPG (Imbituba, Macaé e Salvador), com o objetivo de estabelecer uma base para o estudo dos efeitos da topografia do nível médio do mar (TNMM) via integração de informações de ALTSAT. Foi definida uma configuração em que as trilhas dos satélites altimétricos mais recentes são praticamente colineares àquelas estações da RMPG. De forma a homogeneizar os níveis de referência das observações dessas trilhas conectoras, foram escolhidas trilhas de referência em oceano aberto, longe das áreas de pequena profundidade em que as observações de ALTSAT mostram degradação de qualidade. Ao longo dessas trilhas, foi analisada a solução global de TNMM do Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas (DGFI), cujos resultados para as trilhas conectoras dos mareógrafos mostraram inconsistências em relação aos das trilhas de referência nos respectivos cruzamentos, especialmente no entorno do platô de Abrolhos. Estas inconsistências foram interpretadas como possível efeito residual daquele platô, propagado para os cruzamentos vizinhos durante a filtragem da TNMM. Os estudos desenvolvidos ao longo desta Tese permitiram definir procedimentos de integração de dados de nivelamento geométrico, gravimetria, estações maregráficas e altimetria por satélites, levando em consideração as especificidades do contexto brasileiro.

ABSTRACT

Alternatives are discussed to improve the physical meaning of the Brazilian Geodetic System (SGB) heights by obtaining gravity and geopotential number values for the stations (called RRNN) of the Brazilian Fundamental Vertical Network (RAAP). It is also discussed the incorporation of data from Satellite Altimetry (ALTSAT) and the Permanent Geodetic Tide Gauge Network (RMPG) for the evaluation of those procedures and the connection of the RAAP's and South America's vertical references. Gravity and levelling data from IBGE were analyzed from the point of view of the difficulties of their integration for the computation of their geopotential differences. A subset of recent RAAP lines was identified, in which virtually all RRNN have direct, homogeneous gravimetric information. A computer program was developed specifically for the integration of gravity information into the leveling data and the organization of the network of internodal geopotential differences. With this sub-network of RAAP, it was possible to simulate various scenarios of the lack of gravity over RRNN, assessing the interpolated values via least squares collocation by the computer program provided by SIRGAS Project. The simulations indicated an overestimation of the quality of interpolation by the program, especially in the more general cases of inadequate distribution of the reference values. It was discussed the influence of spatial and temporal heterogeneities in the adjustment of internodal geopotential differences, through the analysis of the effects of the partitioning strategy adopted in the RAAP's preliminary adjustment (AAGP), in which IBGE computed the heights currently stored in its Geodetic Database (BDG). The simultaneous adjustment of the same network originally partitioned in AAGP showed excessive distortions in the height values, besides correcting a problem arising from RAAP's heterogeneity near Imbituba. This partial assessment of AAGP provided insights for the organization of a sub-network of RAAP connecting three RMPG stations (Imbituba, Macaé and Salvador), aiming for the establishment of a reference for the study of the sea surface topography (SSTop) effects via integration of ALTSAT information. It was defined a configuration in which the tracks of the most recent altimetry satellites are virtually colinear to those RMPG stations. In order to homogenize the reference levels of the observations of these TG-tracks, reference tracks were chosen in the open ocean, far from small depth areas where ALTSAT observations show quality degradation. Along these tracks, the global SSTop solution from the German Geodetic Research Institute (DGFI) was examined, whose results for the TG-tracks showed inconsistencies regarding the REF-tracks at their crossing points, especially around the Abrolhos plateau. These inconsistencies were interpreted as a possible residual effect of that plateau, spreading to the neighbouring crossings during the SSTop filtering. The studies carried out along this Thesis helped the definition of procedures for integrating leveling, gravity, sea level and satellite altimetry data, taking into account the specificities of the Brazilian context.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro | 4 |
| Figura 2 – Variação de altitude ao longo do circuito de Imbituba | 5 |
| Figura 3 – Linhas de nivelamento da RAAP e parte da rede vertical SIRGAS..... | 7 |
| Figura 4 – Discrepâncias entre o Datum de Imbituba e o NMM local em algumas estações maregráficas ao longo do litoral brasileiro | 9 |
| Figura 5 – Elementos básicos para a descrição da gravidade | 18 |
| Figura 6 – Gravitação lunar | 23 |
| Figura 7 – Coordenadas geodésicas..... | 29 |
| Figura 8 – Elementos envolvidos no PVCG | 37 |
| Figura 9 – Elementos básicos da Colocação por mínimos quadrados..... | 42 |
| Figura 10 – Forma geral das funções covariância..... | 44 |
| Figura 11 – Elementos envolvidos na definição das altitudes físicas..... | 46 |
| Figura 12 – Aquífero Guarani..... | 50 |
| Figura 13 – Conexão transoceânica de sistemas verticais | 55 |
| Figura 14 – Informações do estuário do Rio Amazonas no modelo hidrodinâmico da Coppe/UFRJ | 56 |
| Figura 15 – Malha do modelo da Coppe/UFRJ para a região de Salvador | 57 |
| Figura 16 – Discrepâncias entre data verticais obtidas por modelagem iterativa do geopotencial..... | 59 |
| Figura 17 – Estimativas da variação de W_0 | 61 |
| Figura 18 – Diagrama esquemático do marégrafo convencional | 62 |
| Figura 19 – Níveis de referência das observações maregráficas..... | 63 |
| Figura 20 – Controle geodésico de estações maregráficas | 65 |
| Figura 21 – Síntese dos elementos envolvidos na observação do nível do mar com satélites altimétricos | 67 |
| Figura 22 – Nivelamento geométrico..... | 69 |
| Figura 23 – Elementos de uma rede de nivelamento geométrico | 71 |
| Figura 24 – Evolução temporal da RAAP..... | 80 |
| Figura 25 – Exemplo de Heterogeneidade espacial e temporal da RAAP | 80 |
| Figura 26 – Modelo atual de chapa para materialização de estações geodésicas do IBGE..... | 81 |
| Figura 27 – Modelo atual de referência de nível do IBGE..... | 82 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28 – Porção da RAAP na região dos Data Verticais de Torres e Imbituba | 84 |
| Figura 29 – Dados de estações maregráficas do IAGS no Brasil armazenados no PSMSL | 86 |
| Figura 30 – Ajustamentos da RAAP | 90 |
| Figura 31 – Seqüência hierárquica dos Ajustamentos da RAAP | 92 |
| Figura 32 – Geometria do AAGP | 93 |
| Figura 33 – Exemplo de formação de circuito com as linhas da RAAP..... | 94 |
| Figura 34 – Áreas de possíveis conexões internacionais da RAAP | 99 |
| Figura 35 – IGSN-71 (Brasil), RGFB e RENEGA..... | 100 |
| Figura 36 – Estações Gravimétricas determinadas pelo IBGE e por outras instituições | 102 |
| Figura 37 – EEGG do IBGE coincidentes com RRNN da RAAP..... | 103 |
| Figura 38 – Possíveis estações de complementação da rede de referência vertical SIRGAS | 104 |
| Figura 39 – Evolução do NMM mensal em Imbituba..... | 107 |
| Figura 40 – Níveis médios semanais nas estações da RMPG em 2003..... | 108 |
| Figura 41 – Evolução do desnível entre as RRNN 1033-A e 2969-F | 109 |
| Figura 42 – Gráficos dos testes “Van de Castele” de 2002 a 2007 em Imbituba .. | 111 |
| Figura 43 – Nivelamentos no entorno imediato dos marégrafos | 112 |
| Figura 44 – Nivelamentos da UFPR na área do porto de 2005 a 2007 | 113 |
| Figura 45 – Cronologia das missões altimétricas..... | 115 |
| Figura 46 – Arranjo espacial das trilhas dos satélites considerados | 115 |
| Figura 47 – Níveis de referência dos dados maregráficos e altimétricos | 116 |
| Figura 48 – Desvios-padrão, rede LPLI1..... | 121 |
| Figura 49 – Diferenças (m) entre altitudes, redes AAGP e LPLI1 | 122 |
| Figura 50 – Efeitos da inclusão do vínculo entre 4P e P4P..... | 124 |
| Figura 51 – Diferenças entre altitudes ao longo da costa brasileira | 125 |
| Figura 52 – Área de testes de integração de gravidade à RAAP | 127 |
| Figura 53 – Velocidades verticais associadas à nova solução SIRGAS | 128 |
| Figura 54 – Diferenças entre altitudes niveladas e dinâmicas | 129 |
| Figura 55 – Anomalias da gravidade e diferenças entre altitudes..... | 130 |
| Figura 56 – Rede de nivelamento e gravimetria na área de testes | 131 |
| Figura 57 – Desvios-padrão das altitudes dinâmicas da rede de testes | 134 |
| Figura 58 – Gravidade observada e respectivas anomalias no circuito 3 | 135 |
| Figura 59 – Correções para os desníveis observados no circuito 3..... | 136 |

| | |
|---|-----|
| Figura 60 – Configuração das simulações para avaliação da interpolação..... | 139 |
| Figura 61 – Diferenças entre gravidade observada e interpolada..... | 141 |
| Figura 62 – Desvios-padrão nominais (mGal) da interpolação de gravidade na RAAP | 143 |
| Figura 63 – Distribuição das EEGG(IBGE)xRRNN em relação às províncias estruturais brasileiras | 144 |
| Figura 64 – Passagens selecionadas para a integração com a RMPG | 146 |
| Figura 65 – Organização de dados de ALTSAT segundo a estrutura de bins | 147 |
| Figura 66 – Redução das anomalias de nível do mar ao centro dos bins | 148 |
| Figura 67 – Exemplos de degradação da qualidade da informação de ALTSAT em função da proximidade da linha costa..... | 149 |
| Figura 68 – Exemplos da melhoria da qualidade dos dados de ALTSAT com o aumento da distância | 150 |
| Figura 69 – Exemplos de correção da refração troposférica úmida | 151 |
| Figura 70 – Exemplos de desvio-padrão da medida altimétrica..... | 151 |
| Figura 71 – Diferentes conjuntos de dados considerados na composição da base de dados de ALTSAT intercalibrados do DGFI | 152 |
| Figura 72 – Valores de SMM ao longo das trilhas da configuração inicial | 153 |
| Figura 73 – Dados de ALTSAT ao longo das trilhas de referência | 154 |
| Figura 74 – Perfis de TNMM nas trilhas de referência | 156 |
| Figura 75 – Variação temporal da TNMM nas trilhas das estações da RMPG | 157 |
| Figura 76 – Interpolação da TNMM para a trilha transversal nominal..... | 158 |
| Figura 77 – Séries temporais de TNMM nos cruzamentos de trilhas..... | 161 |
| Figura 78 – Desvios-padrão das diferenças de TNMM | 163 |
| Figura 79 – Médias das diferenças entre as séries temporais de TNMM nos cruzamentos de trilhas ascendentes (REF) e descendentes (marégrafos)..... | 164 |
| Figura 80 – TNMM média na região de trabalho estendida | 165 |
| Figura 81 – Exemplos de variabilidade dos dados enviados pelo IBGE | 169 |
| Figura 82 – Exemplo de distribuição das diferenças sucessivas | 170 |
| Figura 83 – Exemplo de “suavização” (via média móvel) e filtragem (interpolação via spline cúbica)..... | 171 |
| Figura 84 – Heterogeneidade temporal da RAAP entre o DVB-I e Salvador | 176 |
| Figura 85 – Sub-rede de circuitos litorâneos entre Imbituba e Rio de Janeiro | 177 |
| Figura 86 – Diferenças entre as altitudes normais-ortométricas e as altitudes físicas da sub-rede Imbituba-Rio..... | 179 |
| Figura 87 – Variação das altitudes e correções de gravidade nos desníveis de duas linhas do circuito de Imbituba | 181 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 – Grandezas associadas aos GRS-24/30, -67 e -80..... | 30 |
| Quadro 2 – Elementos de controle e transferência dos níveis de referência das observações maregráficas | 63 |
| Quadro 3 – Especificação parcial do formato DECAN para nivelamento | 95 |
| Quadro 4 – Exemplo de formação de circuito com as linhas da RAAP | 95 |
| Quadro 5 – Especificação do formato EST para gravimetria | 105 |
| Quadro 6 – Exemplo de LINHAS gravimétricas do IBGE | 105 |
| Quadro 7 – Resumo do ajustamento dos desníveis dinâmicos internodais..... | 132 |
| Quadro 8 – Exemplo de relatório de análise das séries temporais “ascendentes” e “descendentes” de TNMM para Salvador..... | 159 |
| Quadro 9 – Exemplo de relatório de análise das séries temporais “ascendentes” e “descendentes” de TNMM para Imbituba | 160 |
| Quadro 10 – Exemplos de dados de nível do mar do IBGE | 167 |
| Quadro 11 – Exemplo de relatório resumido do CRITNM..... | 172 |
| | |
| Tabela 1 – Principais componentes da maré gravimétrica | 22 |
| Tabela 2 – Coeficientes de grau<3, EGM96 e GGM-02C..... | 36 |
| Tabela 3 – Estimativas “atualizadas” de alguns parâmetros fundamentais | 36 |
| Tabela 4 – Precisão necessária para interpolação de gravidade..... | 44 |
| Tabela 5 – Características dos ajustamentos da RAAP | 89 |
| Tabela 6 – Comparação entre desníveis dos ajustamentos de 1952 e 1993 | 91 |
| Tabela 7 – Inconsistências extremas entre os arquivos de RRNN e EEGG..... | 97 |
| Tabela 8 – Resultados dos testes “Van de Casteele” de 2002 a 2007 em Imbituba | 112 |
| Tabela 9 – Resumo dos ajustamentos das redes “AAGP-modificadas” | 120 |
| Tabela 10 – Erros de fechamento dos circuitos da rede selecionada..... | 132 |
| Tabela 11 – Ajustamento dos desníveis dinâmicos internodais..... | 133 |
| Tabela 12 – Síntese dos dados de nível do mar enviados pelo IBGE | 167 |
| Tabela 13 – Resumo dos resultados da crítica preliminar dos dados da estação da RMPG em Macaé..... | 173 |
| Tabela 14 – Diferenças entre altitudes da sub-rede Imbituba-Rio | 178 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| AAGP | Ajustamento Altimétrico Global Preliminar |
| ALTSAT | Altimetria por Satélites |
| BDG | Banco de Dados Geodésicos |
| CBD | Companhia Brasileira de Dragagem |
| CDI | Companhia Docas de Imbituba |
| CNG | Conselho Nacional de Geografia |
| CNO | correção normal-ortométrica |
| CPGCG | Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas |
| DCF | dispositivo de centragem forçada |
| DGFI | <i>(Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut)</i> Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas |
| DHN | Diretoria de Hidrografia e Navegação |
| DNPRC | Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais |
| DSG | Diretoria do Serviço Geográfico do Exército |
| DVB-I | Datum Vertical Brasileiro em Imbituba |
| DVB-S | Datum Vertical Brasileiro em Santana |
| EEGG | Estações Gravimétricas |
| EGM | <i>(Earth Gravity Model)</i> modelo do geopotencial |
| EMB | <i>(electromagnetic bias)</i> diferença de medida de ALTSAT em função da interação do pulso de radar com a superfície refletiva |
| EMEC | Estação Maregráfica Experimental de Copacabana |
| GBVP | <i>(geodetic boundary value problem)</i> ver PVCG |
| GDR | <i>(geophysical data records)</i> conjunto de dados de ALTSAT resultante do processamento das observações primárias |
| GDR-M | <i>(merged GDR)</i> série unificada de dados dos dois altímetros do T/P |

| | |
|----------|--|
| GIK | (<i>Geodätisches Institut Karlsruhe</i>) Instituto Geodésico da Universidade de Karlsruhe |
| GNSS | (<i>Global Navigation Satellite Systems</i>) denominação genérica dos sistemas globais de posicionamento e navegação por satélites, como o GPS |
| GPS | (<i>Global Positioning System</i>) Sistema Global de Posicionamento |
| GRACE | (<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>) missão espacial de observação das variações temporais do campo da gravidade, constituída por dois satélites |
| GT-III | Grupo de Trabalho “Datum Vertical” do Projeto SIRGAS |
| IAG | (<i>International Association of Geodesy</i>) Associação Internacional de Geodésia |
| IAG/USP | Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo |
| IAGS | <i>Inter American Geodetic Survey</i> |
| IB | (<i>inverse barometer</i>) barômetro inverso, efeito da variação do nível do mar, de forma inversamente proporcional à variação da pressão atmosférica |
| IBGE | Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IC-P | (<i>Inter-Commission Project</i>) projeto vinculado a múltiplas Comissões da IAG |
| IC-P 1.2 | Projeto “Estruturas de Referência Vertical” da IAG |
| IC-WG | (<i>Inter-Commission Working Group</i>) grupo de trabalho vinculado a múltiplas Comissões da IAG |
| IfE | (<i>Institut für Erdmessung</i>) Instituto de Geodésia da Universidade de Hannover |
| IGG | Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo |
| IGLD-85 | (<i>International Great Lakes Datum</i>) Datum Internacional dos Grandes Lagos de 1985 |
| IGSN-71 | (<i>International Gravity Standardization Network</i>) Rede Internacional de Padronização da Gravidade |
| InPH | Instituto de Pesquisas Hidroviárias |
| IOC | Comissão Oceanográfica Intergovernamental |

| | |
|----------|---|
| ITRF | (<i>International Terrestrial Reference Frame</i>) Rede Internacional de Referência Terrestre |
| LARAS | Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites da UFPR |
| LOD | (<i>length of day</i>) diferença entre a duração real do dia (observada) e a duração nominal (86400 segundos) |
| LSC | (<i>least squares collocation</i>) colocação por mínimos quadrados |
| MC | macrocircuito do AAGP |
| MGDR | ver GDR-M |
| MVC | matriz variância-covariância |
| NA | nível d'água |
| NAVD-88 | (<i>North American Vertical Datum</i>) Datum Vertical Norte-Americano de 1988 |
| NGWLMS | (<i>Next Generation Water Level Measurement System</i>) "sistema de medição de nível d'água da próxima geração" |
| NMM | nível médio do mar |
| NMM-168h | NMM suavizado com filtro de 168 horas |
| NS | sub-rede "Nortesul" da RAAP |
| ON | Observatório Nacional |
| PSMSL | (<i>Permanent Service for Mean Sea Level</i>) "Serviço Permanente para o Nível Médio do Mar" |
| PVCAG | problema de valor de contorno altimétrico-gravimétrico |
| PVCG | problema de valor de contorno geodésico |
| RAAP | Rede Altimétrica de Alta Precisão |
| RENEGA | Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas |
| RGFB | Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira |
| RMPG | Rede Maregráfica Permanente para Geodésia |
| RN | ver RRNN |
| RRNN | referências de nível, isto é, as estações geodésicas da RAAP |

| | |
|----------|---|
| SCGGSA | Sub-Comissão da IAG para Gravidade e Geóide na América do Sul |
| SF | superfície física |
| SGB | Sistema Geodésico Brasileiro |
| SGE | Serviço Geográfico do Exército, atual DSG |
| SGR | Sistema Geodésico de Referência |
| SIRGAS | Sistema de Referência Geocêntrico das Américas |
| SLA | (<i>sea level anomaly</i>) anomalia do nível do mar em relação à SMM |
| SLACOB | SLA no centro da célula (<i>bin</i>) de observações de ALTSAT |
| SMM | superfície média do mar |
| SRTM | (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) missão topográfica do ônibus espacial |
| SRVG | Sistema de Referência Vertical Global |
| SSB | (<i>sea state bias</i>) diferença de medida de ALTSAT em função da variabilidade da superfície refletiva |
| SSH | (<i>sea surface height</i>) altura do nível do mar – incluindo correção da maré oceânica –, em relação ao elipsóide, derivada de ALTSAT |
| SSTop | (<i>sea surface topography</i>) ver TNMM |
| STDALT | desvio-padrão da medida altimétrica |
| SVSIRGAS | Sistema Vertical SIRGAS |
| TG | (<i>tide gauge</i>) marégrafo |
| T/P | satélite altimétrico TOPEX/Poseidon |
| T/P-EM | (<i>T/P extended mission</i>) configuração orbital do T/P nas trilhas de adensamento do Jason-1 |
| TNMM | topografia do nível médio do mar |
| UFPR | Universidade Federal do Paraná |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| USP | Universidade de São Paulo |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|--|
| α_1, α_2 | parâmetros da correção normal-ortométrica e da antiga fórmula de Helmert para a gravidade normal |
| β | achatamento gravítico |
| γ | gravidade normal; fator clinométrico |
| γ_m | valor médio da gravidade normal entre o quase-geóide e a superfície física, ao longo da vertical do campo normal |
| δ | declinação do astro; fator gravimétrico |
| δg | distúrbio da gravidade |
| ΔC | diferença de geopotencial |
| Δg | anomalia da gravidade |
| ΔH_{AB}^{obs} | diferença de nível observada entre os pontos A e B |
| ε | excentricidade linear do elipsóide |
| ζ | anomalia de altitude |
| λ | longitude geodésica |
| ρ | densidade ou coeficiente de correlação |
| ω | velocidade angular da Terra |
| $\bar{\varphi}$ | latitude geocêntrica |
| φ | latitude geodésica |
| a | semi-eixo maior do elipsóide |
| b | semi-eixo menor do elipsóide |
| dg^{total} | efeito total da maré permanente sobre a gravidade |
| e | primeira excentricidade (relativa) do elipsóide |

| | |
|----------------------------|--|
| e' | segunda excentricidade (relativa) do elipsóide |
| f | achatamento do elipsóide |
| $\underline{\mathbf{F}}^C$ | força centrífuga |
| $\underline{\mathbf{F}}^G$ | atração gravitacional |
| $\underline{\mathbf{g}}_P$ | vetor gravidade no ponto P |
| \bar{g}_{global} | média global da gravidade |
| G | constante universal da gravitação |
| GM | constante gravitacional geocêntrica |
| g_{AB}^{obs} | média dos valores observados da gravidade nos pontos A e B |
| g_m | valor médio da gravidade entre o geóide e a superfície física, ao longo da vertical |
| h | altitude geométrica (ou elipsoidal) |
| h_n | número de Love (ou Love-Shida) de grau n |
| H^D | altitude dinâmica |
| H^H | altitude de Helmert |
| H^N | altitude normal |
| H^{Nort} | altitude normal-ortométrica |
| H^{ort} | altitude ortométrica |
| J_2 | achatamento dinâmico ou fator dinâmico de forma |
| k_n | segundo número de Love de grau n |
| M | massa da Terra |
| M' | massa do astro (no potencial de maré) |
| N | altura geoidal |
| \tilde{N} | matriz dos coeficientes dos parâmetros nas equações normais do ajustamento paramétrico |

| | |
|-------------|--|
| r_{cruz} | correção radial da órbita do satélite altimétrico decorrente da análise dos cruzamentos (<i>crossover</i>) de suas trilhas |
| R_{altim} | medida altimétrica nominal, derivada da observação de t_{altim} |
| R_{corr} | medida altimétrica corrigida dos efeitos instrumentais, atmosféricos, da superfície de reflexão e geofísicos |
| t | ângulo horário do astro |
| t_{altim} | intervalo de tempo entre a emissão do pulso de radar pelo satélite altimétrico e sua recepção após reflexão na superfície oceânica |
| T | potencial anômalo, ou perturbador |
| U_0 | esferopotencial do elipsóide de nível |
| \tilde{U} | matriz dos termos independentes nas equações normais do ajustamento paramétrico |
| V^T | potencial de maré |
| W | geopotencial |
| W^G | parcela gravitacional do geopotencial |
| W^C | parcela centrífuga do geopotencial |
| W_0 | geopotencial do geóide |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. APRESENTAÇÃO | 1 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA..... | 1 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 11 |
| 1.3.1 – Objetivo Geral..... | 11 |
| 1.3.2 – Objetivos Específicos | 11 |
| 1.4. CONTRIBUIÇÕES E ORGANIZAÇÃO | 11 |
| 1.4.1 – Contribuições..... | 11 |
| 1.4.2 – Organização dos Capítulos | 12 |
| 1.4.3 – Recursos e Suporte..... | 14 |
| | |
| 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS | 17 |
| 2.1. APRESENTAÇÃO | 17 |
| 2.2. O GEOPOTENCIAL COMO REFERÊNCIA ESPACIAL NATURAL | 17 |
| 2.2.1 – Elementos básicos | 17 |
| 2.2.2 – Variações temporais do geopotencial..... | 21 |
| 2.2.3 – Referência geométrica | 27 |
| 2.2.4 – Geopotencial e geóide..... | 32 |
| 2.2.5 – Colocação por mínimos quadrados | 41 |
| 2.2.6 – Posicionamento vertical..... | 44 |
| 2.3. SISTEMAS DE ALTITUDES | 53 |
| 2.3.1 – Sistema de referência vertical global e topografia do NMM | 53 |
| 2.3.2 – Observação do nível do mar..... | 61 |
| 2.3.2.1 – Estações maregráficas | 61 |
| 2.3.2.2 – Altimetria por Satélites..... | 66 |
| 2.3.3 – Redes verticais..... | 69 |
| 2.3.3.1 – Nivelamento geodésico | 69 |
| 2.3.3.2 – Gravimetria..... | 73 |
| 2.3.3.3 – Integração Gravimetria-Nivelamento | 75 |
| 2.3.3.4 – Ajustamento paramétrico..... | 76 |
| | |
| 3. FONTES DE DADOS..... | 79 |
| 3.1. REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO DO SGB..... | 79 |
| 3.1.1 – Materialização | 81 |
| 3.1.2 – Datum..... | 83 |
| 3.1.3 – Observações | 86 |
| 3.1.4 – Realizações..... | 88 |
| 3.1.5 – Organização dos dados..... | 94 |
| 3.1.6 – Conexões internacionais | 97 |

| | |
|--|-----|
| 3.2. REDES GRAVIMÉTRICAS BRASILEIRAS | 100 |
| 3.2.1 – Redes de Referência..... | 100 |
| 3.2.2 – Estações de Densificação | 101 |
| 3.2.3 – Organização dos dados..... | 104 |
| 3.3. REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA | 106 |
| 3.3.1 – Observação do nível do mar..... | 106 |
| 3.3.2 – Níveis de referência..... | 108 |
| 3.4. MISSÕES ALTIMÉTRICAS | 114 |
| 4. INTEGRAÇÃO DE GRAVIDADE À RAAP | 119 |
| 4.1. FORMAÇÃO DE REDE PARA AJUSTAMENTO | 119 |
| 4.2. SISTEMA COMPUTACIONAL IDNOS | 125 |
| 4.3. ÁREA DE TESTES DE INTEGRAÇÃO GRAVIDADE-NIVELAMENTO..... | 126 |
| 4.4. INTERPOLAÇÃO DE GRAVIDADE..... | 137 |
| 4.4.1 – Ferramentas computacionais utilizadas | 137 |
| 4.4.2 – Resultados na sub-rede NS | 138 |
| 4.4.3 – Interpolação de gravidade para toda a RAAP | 142 |
| 5. PREPARAÇÃO PARA INTEGRAÇÃO DE ALTSAT À RAAP | 145 |
| 5.1. ESTRATÉGIA PARA PROPAGAÇÃO DA TNMM ATÉ A COSTA..... | 145 |
| 5.2. BASES DE DADOS DO DGFI | 147 |
| 5.2.1 – Reorganização por células (bins) | 147 |
| 5.2.2 – TNMM..... | 155 |
| 5.3. BASE DE DADOS DA RMPG..... | 166 |
| 5.3.1 – Crítica preliminar | 167 |
| 5.3.2 – Análise harmônica e filtragem | 172 |
| 6. ESTRATÉGIAS PARA MODERNIZAÇÃO DA RAAP VIA INTEGRAÇÃO DE MÚLTIPLAS TÉCNICAS E MODELOS GEODÉSICOS..... | 175 |
| 6.1. PROPAGAÇÃO DA TNMM ATÉ AS ESTAÇÕES DA RMPG..... | 175 |
| 6.2. A SUB-REDE IMBITUBA-MACAÉ-SALVADOR | 175 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 182 |
| 8. RECOMENDAÇÕES | 188 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 191 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) não atende aos requisitos modernos de posicionamento vertical, dentre os quais se incluem a vinculação consistente entre redes verticais nacionais em um mesmo continente e sua integração com os produtos das técnicas geodésicas espaciais. Tal inadequação tem impactos diretos na qualidade dos modelos regionais do geopotencial e, conseqüentemente, na conversão dos resultados de levantamentos geodésicos conduzidos com os GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) ao sistema tradicional de altitudes. A principal causa é a ausência de informações gravimétricas homogêneas vinculadas sistematicamente à RAAP, bem como a diversidade de referenciais das demais informações gravimétricas, não vinculadas à RAAP. Nesta Tese são analisadas alternativas para obtenção de valores de gravidade nas estações da RAAP (RRNN, referências de nível) e cálculo dos respectivos números geopotenciais, de forma a propiciar significado físico às altitudes do SGB. Discute-se também a aplicação de dados de altimetria por satélites para avaliação desses procedimentos e conexão dos referenciais verticais da RAAP e da América do Sul.

1.2. JUSTIFICATIVA

O conceito de altitude permeia as atividades rotineiras de variadas áreas do conhecimento humano. Projetos de irrigação e drenagem, por exemplo, não podem prescindir do correto posicionamento vertical dos elementos de captação, armazenamento, distribuição, coleta e descarga de água. Por outro lado, a insegurança a respeito da precisão das altitudes utilizadas na navegação aérea leva ao estabelecimento de imensas margens de segurança.

Nesse contexto, as modernas técnicas da Geodésia Espacial têm grande potencial de contribuição. Um dos exemplos é a verdadeira revolução conduzida pelos GNSS, com ênfase no GPS (*Global Positioning System*), simplificando rotinas

antes caras e demoradas, e criando novos usos para a informação espacial, dentre outros. No entanto, elas ainda não apresentam solução satisfatória para o posicionamento vertical.

As coordenadas e altitudes fornecidas pelos GNSS referem-se a um elipsóide de revolução, modelo matemático utilizado para simplificar os cálculos geodésicos. Esta simplificação é adequada para o cálculo de latitudes e longitudes, mas acaba por restringir a utilização das altitudes elipsoidais (“geométricas”) pela grande maioria dos interessados no posicionamento vertical. Isso acontece porque as altitudes elipsoidais não têm correspondência rigorosa com o campo da gravidade, assumida apenas pelas chamadas altitudes físicas. Estas são contadas a partir de uma certa superfície de nível (equipotencial) do campo da gravidade, materializada de forma aproximada pelo nível médio do mar (TORGE, 2001, p. 4).

Ainda assim, o GPS pode ser útil no posicionamento vertical – desde que as altitudes geométricas sejam adequadamente convertidas em altitudes físicas (FREITAS, LUZ, 1995). Tal conversão é realizada por intermédio dos modelos geoidais, construídos, por sua vez, a partir de diversos tipos de dados geodésicos, mas principalmente observações gravimétricas corrigidas com auxílio das altitudes físicas. É neste ponto que se começa a delinear a contribuição desta Tese.

As altitudes do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) vêm sendo obtidas exclusivamente por intermédio de observações de nivelamento geométrico, i. e., sem o concurso de informações gravimétricas, desde o início do estabelecimento de sua Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), em 1945 (LUZ et al., 2004, p. 44). O mesmo parece ocorrer na maioria dos países sul-americanos (FREITAS, BLITZKOW, 1999), que também compartilham com o Brasil o procedimento usual de estabelecimento do valor inicial de altitude. O chamado *datum* vertical é tradicionalmente baseado no nível médio do mar (NMM) em um ponto costeiro específico, durante um período de observação maregráfica também específico. No caso do SGB, o *datum* vertical principal foi estabelecido com dados de nível do mar coletados entre 1949 e 1957 no Porto de Imbituba, litoral sul de Santa Catarina (ALENCAR, 1990).

Nos ajustamentos periódicos da RAAP (MATTOS, 1948; BESERRA, 1952; ALENCAR, 1968; RIBEIRO, LUZ, 1991; LUZ et al., 2002b), os impactos da ausência

de observações de gravidade foram minimizados com a aplicação da correção referente à gravidade do modelo elipsóidico (normal-ortométrica, ou “pseudo-ortométrica”, de acordo com GEMAEL, 2002, p. 219). Tal procedimento, contudo, não considera os efeitos da distribuição anômala de densidades, notadamente em áreas montanhosas – como na própria região do *Datum* de Imbituba, em que altitudes de mais de 1400 m são alcançadas pela RAAP a menos de 50 km do mar (Figura 1 e Figura 2). Aqueles efeitos são considerados apenas com a integração de observações gravimétricas aos dados de nivelamento geométrico, permitindo o cálculo dos chamados números geopotenciais (TORGE, 2001, p. 80). Estes, por sua vez, servem de base para os diversos sistemas verticais traduzidos por diferentes tipos de altitudes físicas.

Assim, as altitudes brasileiras não atendem ao conceito rigoroso de altitude física, vinculado intimamente ao campo da gravidade. Este vínculo diz respeito não somente à necessidade de integração de gravimetria aos desníveis observados, mas também à utilização de superfícies de referência específicas. A superfície de referência primordial é o geóide, definido geralmente como a superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre que melhor se ajusta ao NMM global (id., p. 3).

Considerado pontualmente, o NMM é afetado pela chamada topografia do nível médio do mar (TNMM), mesmo para um longo período de observação (op. cit., p. 78). A TNMM varia globalmente em até ± 2 m, em função de fenômenos meteorológicos e oceanográficos, com importantes diferenças entre as plataformas continentais, os oceanos profundos e os mares semi-confinados (LISITZIN, 1974, p. 143).

Portanto, a TNMM em Imbituba afeta as altitudes de grande parte do território brasileiro – apenas a pequena porção da RAAP no Estado do Amapá tem outro referencial, devido à impossibilidade de cruzamento do baixo Rio Amazonas com nivelamento geométrico. No entanto, à semelhança do que acontece nos estuários de outros grandes rios (e. g., MCDOWELL, O'CONNOR, 1977, p. 6), o *Datum* de Santana sofre os efeitos da grande descarga fluvial e, assim, a TNMM nessa região tem características inteiramente diversas daquelas referentes a Imbituba. Neste contexto, o uso de informações geodésicas no entorno da Ilha de Marajó resente-se das inconsistências entre as altitudes referidas a Imbituba e

Santana, cuja modelagem não é trivial – além das diferenças de TNMM, há que se considerar os efeitos adicionais da ausência de informações gravimétricas e da propagação dos erros intrínsecos da RAAP ao longo dos mais de 3.000 km desde Imbituba até Belém (Figura 1).

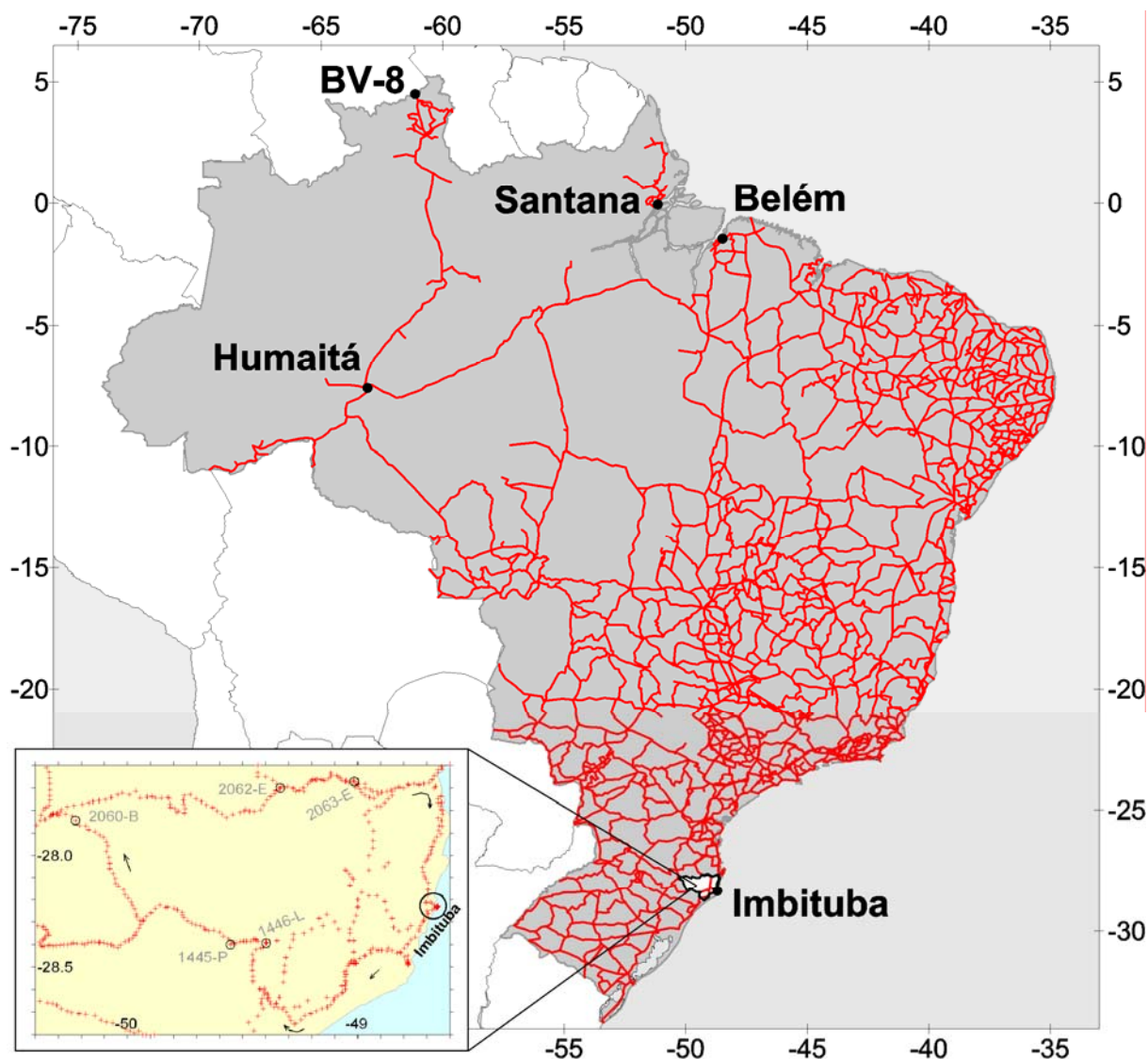


FIGURA 1 – REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO

FONTE: adaptado de Luz et al. (2006a)

NOTA: o circuito “novo” (década de 1980), mostrado no detalhe, contém as RRNN materializadoras do *Datum* de Imbituba – na Figura 25 são discriminadas as linhas da década de 1940

Estendendo o exemplo brasileiro ao contexto sul-americano, constata-se a existência de inúmeras dificuldades relacionadas às incompatibilidades entre os diversos sistemas verticais do continente. De um lado, a TNMM em cada *datum*

vertical assume características diferenciadas, como no caso de Imbituba e Santana. Por outro lado, também são heterogêneos os efeitos da ausência de valores da gravidade no cálculo das altitudes. Além disso, a própria conformação das redes, condicionada principalmente pelo grande “deserto verde” amazônico, introduz dificuldades adicionais. Um exemplo extremo é apresentado por HERNÁNDEZ et al. (2002, p. 326), que constataram uma diferença aproximada de 3,5 m entre altitudes referidas aos *data* venezuelano e brasileiro – erros sistemáticos não modelados e diferenças de TNMM não são suficientes para explicar uma divergência de tal magnitude, mas a hipótese de um erro grosseiro é compatível com a impossibilidade de formação de circuitos na RAAP ao norte de Humaitá (Figura 1).

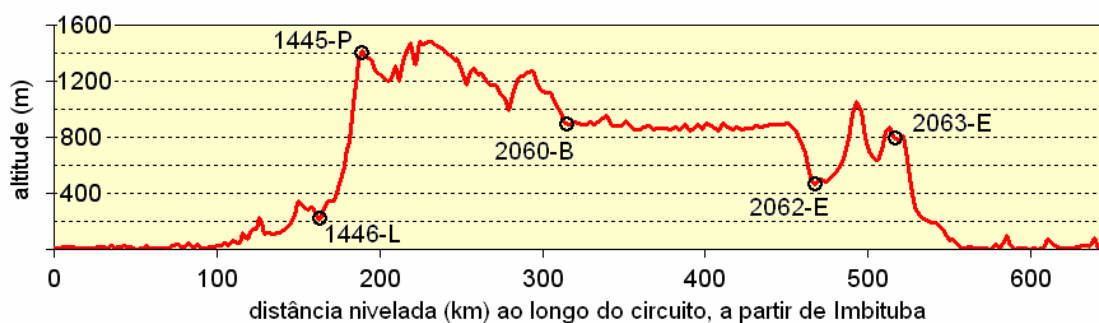


FIGURA 2 – VARIAÇÃO DE ALTITUDE AO LONGO DO CIRCUITO DE IMBITUBA

FONTE: adaptado de Luz et al. (2006a)

NOTA: o circuito de Imbituba é mostrado na Figura 1

As mencionadas incompatibilidades afetam não somente os usuários comuns das informações geodésicas – aqueles envolvidos, por exemplo, em projetos de mapeamento ou engenharia em áreas de fronteira. Tais problemas também se fazem sentir nas próprias atividades geodésicas, a exemplo do cálculo de modelos do campo da gravidade – ou, mais propriamente, do geopotencial. As anomalias de gravidade são diretamente afetadas, por intermédio das altitudes utilizadas na redução dos valores observados de gravidade (HECK, 1990).

Na América do Sul, a discussão objetiva em torno da unificação dos sistemas verticais foi iniciada em 1997, com a criação do Grupo de Trabalho “Datum Vertical” (GT-III) do Projeto SIRGAS (“Sistema de Referência Geocêntrico das Américas”). As primeiras recomendações do GT-III (IBGE, 1998) expressavam que:

- a) o futuro Sistema Vertical SIRGAS (SVSIRGAS) seria definido através de dois conjuntos de altitudes – geométricas e físicas –, bem como pelas respectivas taxas de variação temporal (“velocidades”);
- b) o futuro SVSIRGAS seria materializado através de uma rede de estações geodésicas determinadas com GPS, nivelamento geométrico e gravimetria;
- c) tal rede seria estabelecida com base nas estações da Rede de Referência de 1995, estendida com estações nas fronteiras niveláveis dos países sul-americanos e nas suas principais estações maregráficas – uma rede assim foi efetivamente estabelecida (Figura 3) na Campanha GPS SIRGAS 2000 (LUZ et al., 2002a; DREWES et al., 2005; IBGE, 2002b); e
- d) as autoridades geodésicas dos países deveriam iniciar a organização e o levantamento dos dados necessários ao cálculo dos números geopotenciais, como elementos intermediários para a obtenção das altitudes físicas. Posteriormente (IBGE, 2002a), o GT-III recomendou a adoção das altitudes normais como definidoras da componente física do sistema (DREWES et al., 2002), o que, no entanto, não foi ainda referendado pelo Comitê do Projeto e, portanto, não adotado como resolução.

No caso do SGB, a principal dificuldade em relação à esta última recomendação reside na desvinculação entre os levantamentos gravimétricos e a RAAP. Enquanto o nivelamento geométrico realizado pelo IBGE no contexto da RAAP cobriu praticamente todo o Brasil entre as décadas de 1940 e 1980 (LUZ, GUIMARÃES, 2001), as determinações gravimétricas da mesma instituição concentraram-se na região do *datum* horizontal (Uberaba, MG) entre as décadas de 1950 e 1970, e nos chamados “vazios gravimétricos”, a partir do final dos anos 1980 (e. g., BLITZKOW et al., 2002; LOBIANCO et al., 2005) – apenas recentemente o IBGE estabeleceu outra diretriz para seus levantamentos gravimétricos, tendo como objeto também as novas linhas de nivelamento geométrico. Outras instituições também realizaram densificação gravimétrica (e. g. SUBIZA PIÑA, SOUSA, 2001; BLITZKOW et al., 1990), mas isso não foi suficiente para alcançar uma distribuição adequada sobre as linhas de nivelamento, já que esse não era o objetivo de tais esforços.

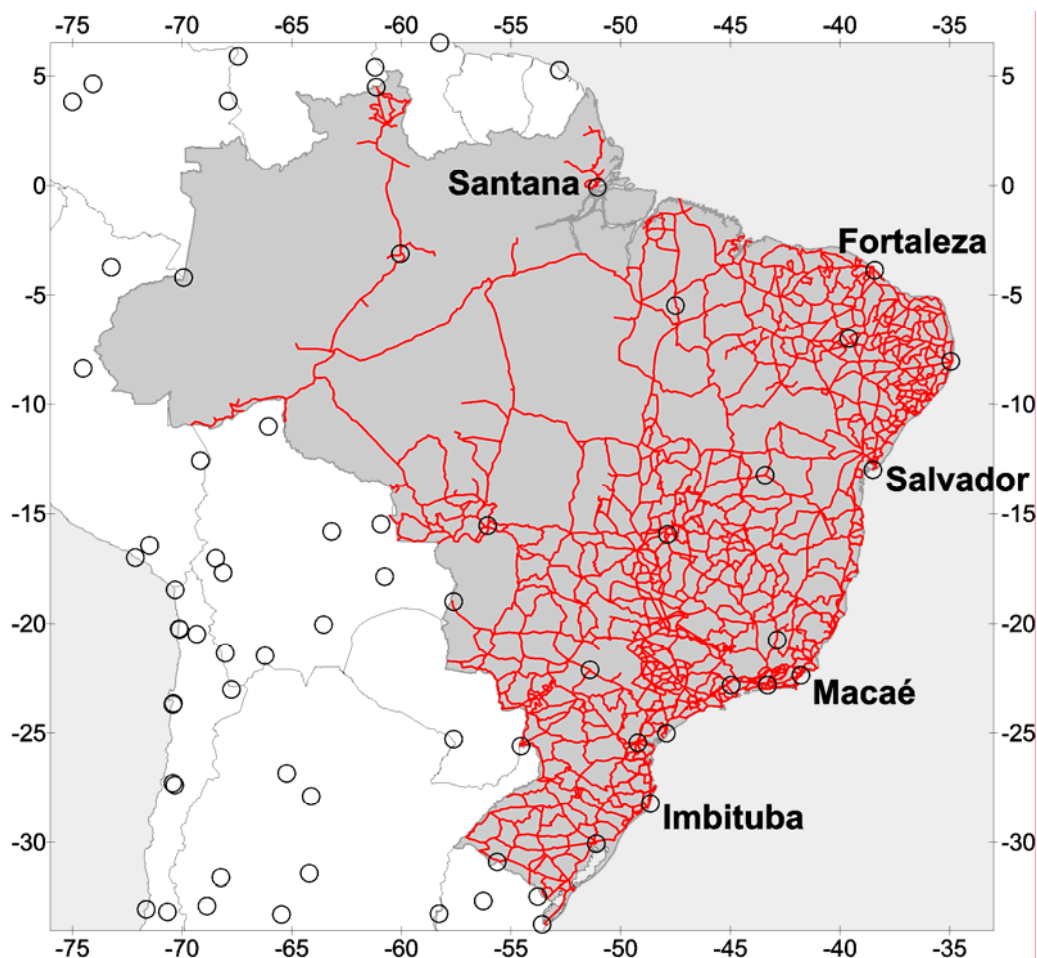


FIGURA 3 – LINHAS DE NIVELAMENTO DA RAAP E PARTE DA REDE VERTICAL SIRGAS

FONTE: adaptado de Luz et al. (2006a)

NOTA: as estações identificadas formam a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)

Mesmo com o início do estabelecimento sistemático de Estações Gravimétricas (EEGG) nas novas linhas de nivelamento geométrico, a integração entre os dois tipos de informação geodésica ainda experimenta dificuldades. Os respectivos sistemas de processamento e bases de dados continuam dissociados, permitindo o surgimento de inconsistências tanto na identificação das estações como nos valores de altitude e coordenadas horizontais. No caso dos levantamentos gravimétricos de outras instituições, incertezas sobre a coincidência com estações da RAAP e sobre os *data* das altitudes e coordenadas horizontais introduzem dificuldades adicionais.

Em vista do pequeno número de estações da RAAP ocupadas diretamente nos levantamentos gravimétricos, é necessário obter valores de gravidade por procedimentos indiretos – como a interpolação via colocação por mínimos

quadrados, recomendada pelo GT-III do SIRGAS (SÁNCHEZ, 2005) com ferramenta computacional fornecida por Drewes (1978). Outras opções existem, como os mapas de anomalias gravimétricas e as redes neurais artificiais (TIERRA CRIOLLO, 2003).

Conforme menção anterior, o GT-III buscou estabelecer, para a materialização do SVSIRGAS, uma rede de estações que contemplasse os marégrafos mais importantes de cada país e as fronteiras niveláveis entre os mesmos. A princípio, os números geopotenciais das estações da Rede de Referência SIRGAS serão obtidos a partir de um ajustamento das diferenças de geopotencial entre as mesmas (IBGE, 2002b), com injunções referentes ao geopotencial do geóide (W_0) nas estações maregráficas que definem os *data* verticais. Neste contexto, é importante estimar, além da TNMM, os efeitos internos da rede sobre a qualidade das conexões entre marégrafos e entre países vizinhos. Os dois conjuntos de diferenças entre altitudes referidas a Imbituba e aos NMM locais, mostrados na Figura 4, exemplificam a importância dessa discussão – a diferença entre um e outro conjunto parece ser causada não apenas pelas diferenças entre as respectivas configurações da RAAP, mas também pelo efeito implícito da TNMM costeira nos referenciais (baseados em dados) maregráficos envolvidos nessa comparação. Para isso, a integração de informações de altimetria por satélites e observações maregráficas é fundamental.

Em relação à integração de estações maregráficas à RAAP, existem dificuldades em relação à disponibilidade de dados e à heterogeneidade dos equipamentos e procedimentos envolvidos na coleta dos mesmos. Um número indeterminado de estações foi desativado após a extinção da Portobrás, no início da década de 1990 – a própria estação de Imbituba é um exemplo disso (IBGE, 1997). Muitas delas, tanto as desativadas quanto as que continuaram em operação, mostravam padrões operacionais incompatíveis com as exigências geodésicas – principalmente no que diz respeito ao controle dos níveis de referência. A fim de contornar esses problemas, o IBGE iniciou em 2001 a implantação da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), cujas estações são também mostradas na Figura 3 (LUZ, GUIMARÃES, 2003).

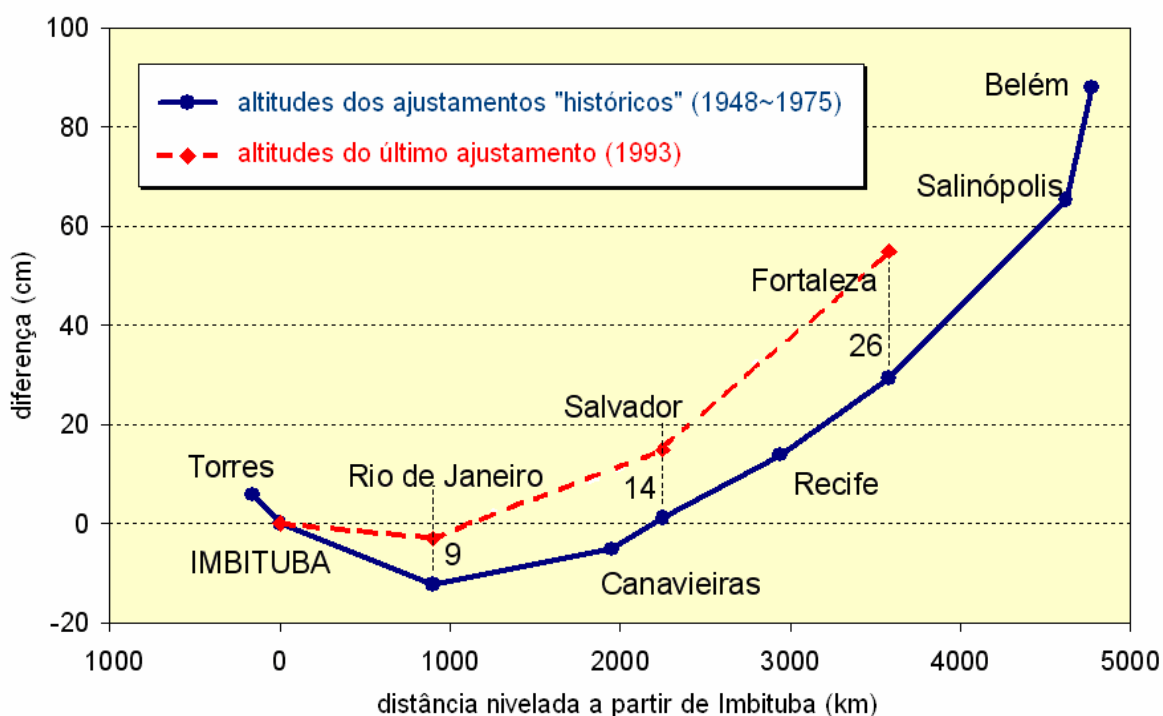


FIGURA 4 – DISCREPÂNCIAS ENTRE O DATUM DE IMBITUBA E O NMM LOCAL EM ALGUMAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS AO LONGO DO LITORAL BRASILEIRO

FONTE: Alencar (1990); Luz, Guimarães (2003)

No caso da estação maregráfica de Imbituba, desde 1997 o Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) da UFPR desenvolve estudos e experimentos para a caracterização da componente anômala do geopotencial e, conseqüentemente, da TNMM (CORDINI, 1998; FREITAS et al., 1999, 2002a, 2007; DALAZOANA, 2005; MIRANDA, 2006; FERREIRA, 2008).

Por seu turno, a altimetria por satélites (ALTSAT) permitiu a observação global do NMM e, conseqüentemente, a determinação da TNMM e do próprio geóide. No entanto, ainda existem incertezas entre as diversas estimativas de W_0 (e. g., BURSA et al., 2004, p. 499; SÁNCHEZ, 2006, p. 644).

As observações de ALTSAT sofrem degradação na medida em que se aproximam de áreas costeiras, como constatado em Imbituba (DALAZOANA, 2005). Assim, a estimativa da TNMM nessas regiões – ou seja, a diferença entre W_0 e os valores W_i do geopotencial nos *data* verticais clássicos – não é trivial, e exige a integração de diversos tipos de informações geodésicas (ANDERSEN, 2002, p. 41).

No que se refere ao SGB, o entendimento das eventuais discrepâncias entre o SVSIRGAS e os *data* de Imbituba e Santana receberá importantes contribuições da ALTSAT. No caso de Santana, tal aplicação apresentará dificuldades adicionais, em vista das características da região do entorno da Ilha de Marajó. De um lado, estão presentes os mesmos problemas de degradação da qualidade das observações altimétricas em áreas costeiras. Por outro lado, o processamento padrão das observações de ALTSAT mostra inadequações, como, por exemplo, no caso da correção de maré, em que os modelos oceânicos globais utilizados apresentam falhas em função da influência da descarga fluvial e de ressonâncias locais (id., p. 43).

Por fim, a citada integração de diversos tipos de informação geodésica deve tratar adequadamente as heterogeneidades dos respectivos referenciais – dentre as quais se enquadram as diferenças entre os *data* das coordenadas horizontais das EEGG, já comentadas. Não tão óbvios são os efeitos das diversas formas de tratamento das deformações do corpo planetário sob a ação gravitacional lunissolar, i. e., as marés planetárias. Mäkinen (2000) menciona que os sistemas de referência geocêntricos globais (ITRS/ITRF) são convencionalmente considerados “livres de maré”, enquanto que o *datum* gravimétrico IGSN-71, as redes verticais sem correção astronômica (como a RAAP) e os resultados de ALTSAT adotam reduções vinculadas à “maré média”. Assim, a integração entre as altitudes elipsoidais e físicas do SVSIRGAS também está sujeita aos efeitos das diferenças de tratamento da chamada maré permanente. O mesmo autor menciona que esses efeitos alcançam a ordem de decímetros no caso de redes continentais, sendo, portanto, significativos no caso sul-americano.

Esta Tese pretende, portanto, investigar os problemas específicos envolvidos na integração da componente vertical do SGB ao futuro SVSIRGAS, bem como propor soluções para os principais deles. Em vista da amplitude do assunto, principalmente em termos de volume e diversidade de dados, não é objetivo do Autor o cálculo de altitudes SIRGAS para cada RRNN do SGB, mas sim o desenvolvimento de procedimentos para a consecução das etapas mais importantes de tal atividade maior.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 – Objetivo Geral

Propor soluções aos principais problemas envolvidos na integração da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) à componente vertical do Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS).

1.3.2 – Objetivos Específicos

- a) estabelecer procedimentos para interpolação da gravidade e cálculo dos números geopotenciais das RRNN do SGB;
- b) analisar as alternativas para ajustamento das diferenças de geopotencial da RAAP, considerando os mecanismos de propagação de erros da RAAP entre Imbituba e as estações maregráficas e pontos de conexão vertical internacional mais distantes;
- c) incorporar informações de altimetria por satélites à investigação do vínculo entre os NMM locais ao longo da costa brasileira;
- d) testar os diversos tipos de altitude física em vista dos efeitos de sua possível adoção sobre os usuários do SGB; e
- e) desenvolver modelos para estimar a discrepância entre os *data* verticais de Santana e Imbituba.

1.4. CONTRIBUIÇÕES E ORGANIZAÇÃO

1.4.1 – Contribuições

Foram analisados e refinados os resultados do ajustamento que deu origem à atual realização vertical do SGB, sob a ótica da estratégia de particionamento da rede nele considerada. Para tanto, o algoritmo do programa computacional utilizado pelo IBGE foi aprimorado e implementado em linguagem mais flexível, resultando na possibilidade de ajustamento simultâneo de toda a rede, sem particionamento. Foram detectados e corrigidos problemas de distorção, oriundos do particionamento,

e de montagem da rede, este decorrente da significativa heterogeneidade temporal da rede de nivelamento em Imbituba.

Foram desenvolvidas especificações e rotinas computacionais para a utilização de informações do SGB no cálculo das diferenças de geopotencial necessárias à definição do SVSIRGAS. Foi montada uma rede de testes dessas especificações e procedimentos computacionais, com dados de nivelamento e gravimetria do IBGE. Também foram desenvolvidas soluções para o uso de dados do SGB em dois programas computacionais disponíveis para a obtenção indireta (interpolação) de informação gravimétrica. Com tais elementos, foram calculadas as diferenças de geopotencial e respectivas altitudes físicas referentes a uma sub-rede da RAAP entre Imbituba e Rio de Janeiro, como configuração inicial para futura extensão a Macaé e Salvador. A comparação das altitudes físicas de tal sub-rede indicou que as altitudes normais implicam em menores diferenças em relação ao tipo de altitudes atualmente adotado no SGB, as normais-ortométricas.

Foi iniciado o tratamento de dados de altimetria por satélites para integração com informações extraídas de modelos do geopotencial e conseqüente obtenção de estimativas da TNMM, visando posterior integração com observações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG). Uma solução global da TNMM, desenvolvida pelo DGFI e disponibilizada para os estudos desta Tese, foi avaliada na costa sul-sudeste brasileira, evidenciando problemas possivelmente decorrentes da degradação de qualidade dos dados de altimetria por satélites em águas rasas.

1.4.2 – Organização dos capítulos

Os aspectos teóricos relacionados aos sistemas verticais são discutidos no Capítulo 2, cujas duas seções buscam tratar de suas definição e realização, tanto quanto tal separação seja possível. Apresentam-se inicialmente os conceitos básicos associados ao estudo do campo da gravidade terrestre, incluindo suas variações temporais e o problema da maré permanente. Os aspectos geométricos são discutidos sob a ótica do apoio à descrição das grandezas vinculadas ao geopotencial. Após tais discussões preparatórias, são analisadas as possibilidades de conceituação e realização do geóide e do sistema de altitudes, ambos em âmbito global, a partir das estruturas de abrangências local e regional já existentes.

Apresentam-se os aspectos básicos da altimetria por satélites como “rede” integradora global daquelas estruturas isoladas, e das estações maregráficas costeiras como interface básica nessa integração.

Previamente discutidos sob o ponto de vista conceitual, os dados oriundos de observações e modelos necessários à presente Tese são descritos no Capítulo 3. As informações geodésicas associadas às altitudes fundamentais brasileiras – nivelamento geométrico e gravimetria no segmento terrestre, marégrafos e missões altimétricas no âmbito oceânico – são apresentadas e caracterizadas como insumo principal aos estudos ora relatados, identificando-se os fatores críticos para sua aplicação bem sucedida.

No Capítulo 4, discute-se a integração das observações terrestres associadas à RAAP para a obtenção das diferenças de geopotencial necessárias à realização, em âmbito continental, da componente física do SVSIRGAS. Inicialmente são estudados alguns aspectos da formação da rede de desníveis a ser submetida ao ajustamento por mínimos quadrados, priorizando-se a homogeneidade temporal como meta. Em seguida, são apresentados os resultados dos experimentos de integração de informações gravimétricas aos desníveis oriundos do nivelamento geométrico.

Os dados de Altimetria por Satélites são tratados, no Capítulo 5, de forma a aproveitar a configuração favorável das trilhas das principais missões em relação às estações da RMPG. A análise dos dados destas estações é conduzida de modo a contornar as dificuldades oriundas da perda de observações de ALTSAT junto à costa. Uma solução global da TNMM com dados de ALTSAT é analisada no âmbito do litoral centro-sul brasileiro.

Finalmente, a integração dos dados oceânicos e terrestres, na área de testes entre Imbituba, Macaé e Salvador, é discutida no Capítulo 6. São analisados os resultados, obtidos nos capítulos anteriores, da conexão dessas estações da RMPG via perfis altimétricos e circuitos litorâneos da RAAP. Discute-se a viabilidade de aplicação de tais procedimentos à conexão dos *data* de Imbituba e Santana no entorno da Ilha de Marajó.

Nos últimos capítulos (7, Conclusões; 8, Recomendações) são sintetizados os resultados alcançados no trabalho, bem como as dificuldades encontradas e problemas a serem abordados em investigações posteriores.

1.4.3 – Recursos e Suporte

A infraestrutura do CPGCG e da UFPR desempenharam papel essencial nos estudos relatados nesta Tese, destacando-se especialmente:

- a infra-estrutura e os recursos computacionais do Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LaRAS), bem como o ambiente acolhedor proporcionado por sua equipe e seu Coordenador, Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas;
- os acervos do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LaIG), do Laboratório de Geodésia Espacial (LaGE) e do Laboratório de Topografia (LabTopo), utilizados em 2005 e 2007 nos levantamentos de controle da materialização local do Datum de Imbituba;
- os recursos bibliográficos físicos e virtuais disponibilizados pela UFPR, com ênfase ao acesso on-line a periódicos como “Journal of Geodesy” e “Geophysics Journal International”; e
- as parcerias internacionais do CPGCG, no contexto das quais foram materializados o estágio (2006) na Universidade de Karlsruhe, na Alemanha, e vários cursos de curta duração com pesquisadores das Universidades de Karlsruhe e Hannover e do Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas (DGFI), entre 2004 e 2007.

Como Servidor Público Federal lotado na Coordenação de Geodésia (CGED) da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), gestora do SGB, o Autor tem acesso a todas as informações referentes ao sistema. Além disso, a CGED apoiou alguns dos levantamentos realizados pelo LARAS/UFPR em Imbituba, promoveu um curso de curta duração com pesquisadores da Universidade de New Brunswick, Canadá, e apoiou a participação do Autor em recente seminário sobre a modernização da RAAP/SGB. Por fim, cabe mencionar a importância da licença de quatro anos concedida pelo IBGE ao Autor, que permitiu sua total dedicação aos aspectos científicos do problema.

A bolsa concedida pelo CNPq também foi fundamental para a permanência do Autor e sua família em Curitiba. A Taxa de Bancada associada à bolsa do CNPq assegurou a participação em vários eventos e a aquisição de material bibliográfico e equipamentos de informática. Destaca-se a participação na Assembléia Científica da Associação Internacional de Geodésia (IAG), realizada em 2005 na Austrália, na qual a Taxa de Bancada foi utilizada para aquisição da passagem aérea.

Cumprir destacar que a participação no evento citado também foi viabilizada pelo apoio financeiro concedido pela própria IAG, que cobriu os demais gastos (inscrição, hospedagem, alimentação). Esta instituição também proporcionou apoio financeiro parcial para participação na Escola do Geóide (Copenhague, Dinamarca, 2006), no 1º Simpósio do Serviço Internacional do Campo da Gravidade (IGFS2006, Istambul, Turquia) e na Assembléia Geral da União Internacional de Geodésia e Geofísica (IUGG2007, Perugia, Itália).

A participação nesta última só foi possível graças ao apoio do CNPq via Projeto “Conexão de Redes Verticais”, coordenado pelo Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas. Este Projeto, dividido nas partes I e II, também tornou possível a realização de cinco campanhas de levantamentos geodésicos no Porto de Imbituba e seu entorno (2005, 2007). Também foram viabilizadas por este Projeto a visita técnica do Autor à Uni-Karlsruhe e ao DGFI em 2004, como preparação do estágio realizado em 2006, e a rápida visita ao Instituto de Geodésia da Universidade de Hannover, em 01/11/2006.

A infra-estrutura do Instituto de Geodésia da Uni-Karlsruhe (GIK), bem como o ambiente acolhedor propiciado por sua equipe e seu Diretor, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Heck, foram determinantes para o sucesso do estágio de oito meses, em 2006. Além da acolhida, o GIK responsabilizou-se pelos custos de transporte referentes à já mencionada participação na Escola do Geóide.

Ao longo dos oito meses de estágio na Alemanha, o DGFI recebeu o Autor durante quatro semanas, concedendo-lhe acesso à infra-estrutura e à base de dados de Altimetria por Satélites. Além disso, o ambiente acolhedor proporcionado desde 2000 ao Autor pela equipe do DGFI, por seu pesquisador, Dr.-Ing. Wolfgang Bosch, e por seu Diretor, Hon.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Drewes, também foram decisivos para o sucesso do estágio.

O estágio na Alemanha não teria ocorrido sem a bolsa e as passagens aéreas concedidas pela CAPES no contexto do Projeto “Densificação do SIRGAS no Brasil com posicionamentos GPS de alta precisão: modelagem de erros e integração da componente vertical”, desenvolvido por UFPR e Uni-Karlsruhe no âmbito do Programa Brasil-Alemanha (PROBRAL, CAPES/DAAD).

Importantes reflexões foram conduzidas com base nos dados gravimétricos fornecidos pela Sub-Comissão da IAG para Gravidade e Geóide na América do Sul (SCGGSA), sediada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), sob Coordenação do Prof. Dr. Denizar Blitzkow.

Tanto quanto possível, foi utilizado *software* livre ou gratuito: Linux (SuSe), OpenOffice, Fortran G77 e Octave. A maioria das figuras foi feita com Surfer 7 do CPGCG.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. APRESENTAÇÃO

A revisão conceitual desenvolvida neste capítulo inicia-se com os aspectos básicos dos sistemas geodésicos de referência utilizados nesta Tese, tanto físicos como geométricos. Tais aspectos básicos são abordados de forma a enfatizar a importância da integração de diferentes modelos funcionais, observacionais, estatísticos e numéricos, discretos ou contínuos, com número finito ou infinito de incógnitas, tal como preconizado pelas teorias mais atuais na interface da Geodésia Física com a moderna prática dos referenciais geodésicos (SANSÒ, 2007). Esta preocupação se torna mais explícita na seção 2.3, em que se discute o arcabouço teórico de um (ainda inexistente) sistema global de altitudes e seu necessário vínculo aos *data* verticais existentes.

2.2. O GEOPOTENCIAL COMO REFERÊNCIA ESPACIAL NATURAL

2.2.1 – Elementos básicos

No dia-a-dia das atividades humanas, o papel fundamental da força de gravidade raramente é reconhecido mesmo que a vertical seja a referência natural mais evidente. A Terra assumiu sua forma atual sob ação da gravidade (TORGE, 2001, p. 45), e é também a gravidade que mantém a atmosfera junto ao planeta. Ela estabelece a orientação espacial de todos os seres vivos no planeta e, no contexto da Geodésia, serve de referência a grande parte das observações – como já apontava em 1828 (id., p. 3) o matemático e geodesta alemão Johann Carl Friedrich Gauss (O'CONNOR, ROBERTSON, 2007). O próprio significado de conceitos básicos como “horizontal” e “vertical” é representativo da importância do campo da gravidade e está implicitamente relacionado aos seus elementos geométricos básicos, i. e., suas linhas de força e superfícies equipotenciais (GRAFAREND, 1994, p. 4).

Antes de abordar tais elementos, porém, cumpre definir a gravidade $\underline{\mathbf{g}}_P$, atuante sobre a massa unitária pontual P na superfície terrestre, como o vetor resultante da composição da atração gravitacional $\underline{\mathbf{F}}^G$ exercida pela massa M da Terra com a força centrífuga $\underline{\mathbf{F}}^C$ oriunda de sua rotação (id., p. 55). Sua magnitude é expressa por:

$$\underline{\mathbf{g}}_P = \underline{\mathbf{F}}_P^G + \underline{\mathbf{F}}_P^C = G \iiint \frac{\underline{\ell} \cdot \rho_i(\underline{\mathbf{r}}')}{|\underline{\mathbf{r}}_P - \underline{\mathbf{r}}'|^3} dv + \omega_i^2 \underline{\mathbf{p}} \quad (1)$$

sendo G a constante universal da gravitação, $\underline{\mathbf{r}}_P$ e $\underline{\mathbf{r}}'$ os vetores-posição definidos pelas componentes cartesianas (x_P, y_P, z_P) e (x', y', z') – ver seção 2.2.3 –, $\rho_i(\underline{\mathbf{r}}')$ a distribuição instantânea de densidades segundo os volumes infinitesimais dv de massa dM , ω_i o módulo da velocidade angular instantânea da Terra, e $\bar{\Phi}_{iP}$ a latitude geocêntrica instantânea (seção 2.2.3) de P . A Figura 5 mostra esquematicamente esses elementos – à exceção da atração gravitacional $\underline{\mathbf{F}}^G$, cuja representação simplificada não seria compatível com as heterogeneidades da distribuição de densidades.

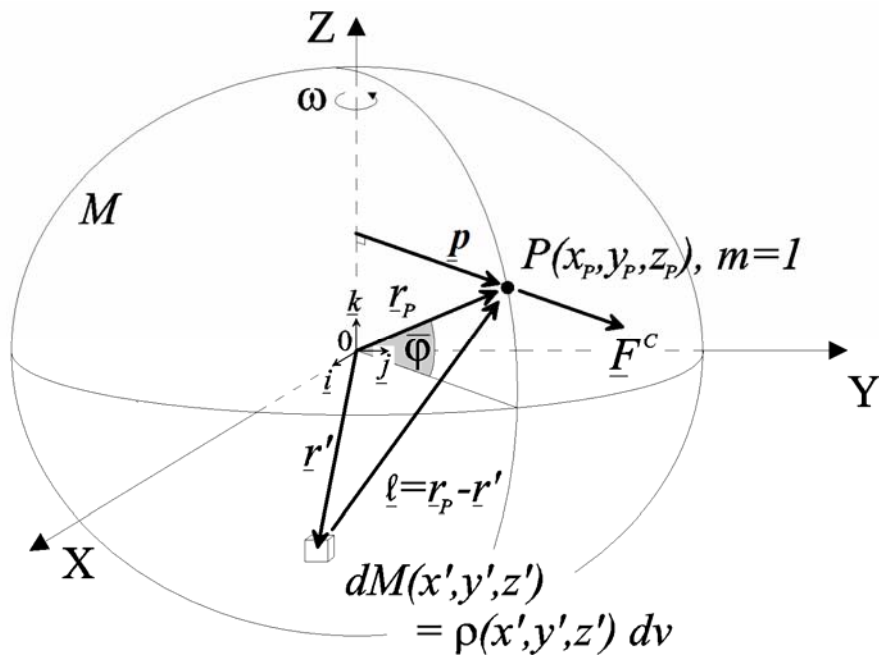


FIGURA 5 – ELEMENTOS BÁSICOS PARA A DESCRIÇÃO DA GRAVIDADE

FONTE: adaptada de Torge (2001, pp. 46 e 54) e Vaníček, Krakiwsky (1986, pp. 72 e 74)

Alguns aspectos devem ser ressaltados nesta definição. O primeiro é que a gravidade \underline{g} é uma força específica, já que a massa m é unitária. Dimensionalmente, a “força” da gravidade ($[N/kg]=[m/s^2]$) equivale, portanto, a uma aceleração (TORGE, 2001, pp. 45 e 171), sendo tradicionalmente expressa em miligal ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 = 10 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ e $1 \text{ } \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2 = 10 \text{ nm/s}^2$).

O segundo aspecto refere-se à natureza vetorial da gravidade, ou seja, a necessidade de manipular um terço de componentes cartesianas para cada ponto considerado neste campo vetorial. No entanto, por se tratar de um campo conservativo (e. g., VANÍCEK, KRAKIWSKY, 1986, p. 83), pode ser adequadamente descrito pelo campo escalar W tal que

$$\underline{g} = \text{grad } W = \underline{\nabla} W = \frac{\partial W}{\partial x} \underline{i} + \frac{\partial W}{\partial y} \underline{j} + \frac{\partial W}{\partial z} \underline{k} \quad (2)$$

sendo \underline{i} , \underline{j} e \underline{k} os vetores unitários na direção dos eixos X, Y e Z, respectivamente. Em vista da equação (1), e promediando-se as variações instantâneas cuja discussão foge ao escopo desta Tese, obtém-se:

$$W = W^G + W^C = G \iiint \frac{\rho(\underline{r}')}{|\underline{r}_P - \underline{r}'|} dv + \frac{\omega^2}{2} (r_p \cos \bar{\varphi}_p)^2 \quad (3)$$

O campo escalar W é denominado potencial da gravidade, ou geopotencial, resultado da composição dos potenciais gravitacional W^G e centrífugo W^C . Referindo-se ao geopotencial, são comuns os termos gravítico e gravífico na bibliografia brasileira e ibérica – e. g., Gemael (2002), Catalão (2000) e Padín Devesa (2007).

A já mencionada distribuição heterogênea de massas no corpo terrestre introduz algumas dificuldades e limitações para a formulação matemática do geopotencial – como o fato da equação (3) não ter solução analítica (TORGE, 2001, p. 66). As alternativas para tratamento do assunto são discutidas na seção 2.2.4.

Outro aspecto a ser considerado na definição de gravidade é o fato da força gravitacional atuante em P não ter origem exclusiva na massa terrestre. Dentre as concentrações significativas de massa nas “vizinhanças” da Terra, as mais importantes são a Lua e o Sol, cujos efeitos gravitacionais mais sensíveis são as

marés planetárias atuantes na terra sólida, oceanos e atmosfera. Em função dos movimentos relativos entre os três corpos, as marés são usualmente consideradas como efeitos periódicos e, por isso, de fácil correção. No entanto, existem componentes não periódicas importantes, cujo tratamento deve ser cuidadosamente considerado. Isso é feito na próxima seção.

O geopotencial tem grande importância na Geodésia, notadamente no contexto da presente Tese, remetendo aos elementos geométricos básicos mencionados anteriormente. O mais intuitivo desses elementos é a família de superfícies em que o geopotencial é constante – isto é, as superfícies equipotenciais, que “representam o plano horizontal local em relação ao qual os instrumentos geodésicos são posicionados” (VANÍCEK, 1976, p. 54).

Tais aspectos geométricos do geopotencial são usualmente discutidos a partir da expressão de sua derivada sob a forma do produto escalar (e. g., HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 48):

$$dW = \frac{\partial W}{\partial x} dx + \frac{\partial W}{\partial y} dy + \frac{\partial W}{\partial z} dz = \mathbf{g} \cdot \mathbf{du} \quad (4)$$

sendo \mathbf{du} um vetor arbitrário, de componentes (dx, dy, dz) .

Desta expressão resulta que o vetor gravidade é sempre ortogonal às superfícies equipotenciais – já que, para \mathbf{du} sobre uma equipotencial qualquer, o trabalho dW é nulo. Daí surge o conceito de linhas de força do geopotencial, ou linhas de prumo: curvas tangentes ao vetor gravidade em cada ponto, ao longo das quais é máxima a variação da magnitude da gravidade.

Linhas de força e superfícies equipotenciais materializam, portanto, os conceitos “vertical” e “horizontal” – na verdade, a definição geodésica de linha vertical é equivalente àquela definição de linha de força, e as equipotenciais são também chamadas superfícies de nível (e. g. TORGE, 2001, p. 57).

Também da equação (4), com \mathbf{du} agora orientado contrariamente a \mathbf{g} ($\mathbf{du} = -d\mathbf{H}$) resulta a importante expressão que relaciona a diferença de geopotencial dW entre duas equipotenciais à distância infinitesimal dH que as separa (id., p. 58):

$$dW = -g dH \quad (5)$$

Esta expressão provê o arcabouço conceitual para a obtenção de diferenças de geopotencial a partir de informações derivadas de levantamentos geodésicos (seção 2.2.6).

Assim, apesar das dificuldades relacionadas à distribuição de densidades e a outras influências, o geopotencial é a opção natural para a parametrização do posicionamento vertical (TORGE, 2001, p. 64). Para tanto, é necessário discutir a seleção de uma das superfícies equipotenciais como referência vertical (seção 2.2.4), usualmente descritas com base em figuras geométricas mais simples (seção 2.2.3). Antes de sua discussão, é necessário tratar dos efeitos das variações temporais do geopotencial.

2.2.2 – Variações temporais do geopotencial

Em decorrência da própria definição de gravidade e geopotencial, seus valores estão sujeitos a alterações causadas por variações da velocidade angular da Terra e grandes deslocamentos de massa. Entre estes últimos se inclui principalmente o movimento periódico da Lua e do Sol em relação à Terra (e. g., HECK, 1993), e também fenômenos no âmbito terrestre, como terremotos (e. g., HAN et al., 2006) e ciclos hidrológicos (e. g., TAPLEY et al., 2004). Enquanto as causas astronômicas, em conexão com as marés oceânicas, são conhecidas e estudadas desde o século XVIII (PUGH, 1987, p. 4), a detecção e quantificação dos outros efeitos (e. g., movimento eustático) apenas recentemente foi alcançada, após a consolidação das técnicas espaciais (RUMMEL, 2002, p. 585).

Assim, a pretendida utilização do geopotencial na parametrização do posicionamento vertical sofre das dificuldades introduzidas pelas mencionadas variações temporais. Os diferentes fenômenos mencionados são interrelacionados e têm diferentes periodicidades. Como exemplo, menciona-se as variações da velocidade angular terrestre em relação ao período nominal de 86400 s, denominadas LOD (*length of day*). Estas variações exibem, dentre outros, um decréscimo secular de 2 ms associado à dissipação energética das marés, e aspectos sazonais vinculados a deslocamentos de massa de origem atmosférica (e. g., LAMBECK, 1988, p. 607; TORGE, 2001, p. 36; CHEN, 2005; HUBER, 2006).

Heck (2004, p. 167) afirma que tais dificuldades podem ser contornadas desde que os efeitos das variações temporais sejam reduzidos mediante modelos suficientemente precisos. Este é o caso, por exemplo, das já citadas variações periódicas do geopotencial de origem luni-solar, explicadas por Newton com auxílio de sua lei de gravitação (PUGH, 1987, p. 4).

Aplicando-a a um ponto qualquer na superfície da Terra, tal como visto na seção 2.2.1, com a consideração adicional das atrações lunar e solar, obtém-se a equação de Laplace de 2ª ordem para o potencial de maré (TORGE, 2001, p. 88):

$$V^T = \frac{3GM'R^2}{4D^3} \left[\begin{array}{l} (1/3 - \overline{\varphi} \sin^2 \delta)(1 - 3 \sin^2 \delta) + \\ + \sin 2\overline{\varphi} \sin 2\delta \cos t + \\ + \cos^2 \overline{\varphi} \cos^2 \delta \cos 2t + \\ \dots \end{array} \right] \quad \begin{array}{l} \text{(longo período)} \\ \text{(diurna)} \\ \text{(semi-diurna)} \\ \text{(ter-diurna etc)} \end{array} \quad (6)$$

sendo M' , δ e t , respectivamente, massa, declinação e ângulo horário do astro, e D sua distância à Terra. Usualmente, este potencial de maré é submetido a uma decomposição espectral que permite expressá-lo como função das chamadas componentes harmônicas – a Tabela 1 mostra exemplos das principais delas.

TABELA 1 – PRINCIPAIS COMPONENTES DA MARÉ GRAVIMÉTRICA

| componente | período (dias/horas solares) | amplitude (nm/s ² = 0,1 μGal) |
|---------------------------------|------------------------------|--|
| longo período: - M ₀ | ∞ | 102,9 |
| - S ₀ | ∞ | 47,7 |
| - S _{sa} | 182,62 d | 14,8 |
| - M _m | 27,55 d | 16,8 |
| - M _f | 13,66 d | 31,9 |
| diurnas: - O ₁ | 25,82 h | 310,6 |
| - P ₁ | 24,07 h | 144,6 |
| - Q ₁ | 26,87 h | 59,5 |
| - K ₁ | 23,93 h | 436,9 |
| semi-diurnas: - M ₂ | 12,42 h | 375,6 |
| - S ₂ | 12,00 h | 174,8 |
| - N ₂ | 12,66 h | 71,9 |
| - K ₂ | 11,97 h | 47,5 |
| ter-diurnas: - M ₃ | 8,28 h | 5,2 |
| ... | ... | ... |

FONTE: TORGE, 2001, p. 89

Nota: valores de amplitude para $\overline{\varphi} = 45^\circ$, $h=0$

Seguindo o citado pressuposto (HECK, 2004, p. 167), os sistemas de referência vertical discutidos nesta Tese baseiam-se na consideração de que a redução das variações temporais é realizável com nível adequado de precisão. Deste modo, “os tradicionais conceitos de altitude geralmente têm por base o campo da gravidade e a superfície terrestre considerados (quase-) estacionários” (id., ibid.).

Na Tabela 1, observa-se que as componentes M_0 e S_0 não são periódicas – seu efeito conjunto é denominado maré permanente. Ekman (1988) propõe uma interpretação geométrica intuitiva para esse efeito, com base na análise da alternância periódica da posição do astro (Lua, Sol etc) em relação ao Equador terrestre (Figura 6).

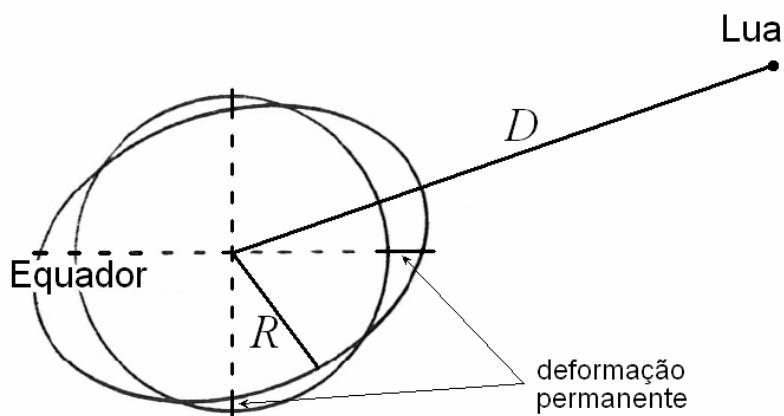


FIGURA 6 – GRAVITAÇÃO LUNAR E MARÉ PERMANENTE

FONTE: adaptado de Ekman (1988, p. 3)

Heck (1993, p. 14) fornece a expressão do efeito direto da maré permanente sobre o geopotencial:

$$V_{M_0S_0}^T = 0,96972 (1 - 3 \sin^2 \bar{\varphi}) \quad (\text{m}^2/\text{s}^2) \quad (7)$$

e a respectiva alteração das superfícies equipotenciais, ou seja, o efeito sobre as próprias altitudes, que decorre da equação (5), como assinala Torge (2001, p. 362):

$$\Delta H_{M_0S_0} = \frac{V_{M_0S_0}^T}{\bar{g}_{global}} = 0,09885 (1 - 3 \sin^2 \bar{\varphi}) \quad (\text{m}) \quad (8)$$

sendo \bar{g}_{global} a média global da gravidade (e. g., $9,81 \text{ m/s}^2$).

Em função das características reológicas do corpo planetário, o efeito direto sobre a crosta, i. e., a deformação radial da própria superfície física, é dado por:

$$\Delta r_{M_0S_0} = h_0 \Delta H_{M_0S_0} = h_0 \frac{V^T_{M_0S_0}}{\bar{g}_{global}} \quad (m) \quad (9)$$

onde h_0 é o número de Love (ou Love-Shida) radial. Tal expressão é válida não somente para a maré permanente, mas também para as outras componentes, com números de Love específicos (diurno h_1 , semi-diurno $h_2...$). A discussão dos efeitos tangenciais foge aos objetivos desta Tese.

As equações (7) a (9) definem os chamados efeitos diretos, causados pelos próprios astros perturbadores. Além disso, a deformação Δr do corpo planetário gera um efeito indireto, sobre o geopotencial, constituído pelo acréscimo oriundo das massas envolvidas na deformação e pelo decréscimo causado pelo respectivo afastamento em relação ao geocentro (e. g., EKMAN, 1988, p. 12; TORGE, 2001, p. 363):

$$\Delta V^{ind} = k V^T - \bar{g}_{global} \Delta r = V^T (k - h) \quad (10)$$

sendo k o segundo número de Love.

Assim, a alteração total do geopotencial é expressa por:

$$\Delta V^{total} = V^T + \Delta V^{ind} = V^T (1 + k - h) = V^T \gamma \quad (11)$$

e a conseqüente alteração da gravidade (id., ibid.):

$$dg^{total} = -\frac{\partial V^T}{\partial R} \left(1 + h - \frac{3}{2} k \right) = -g^T \delta \quad (12)$$

$$g^T = -0,03040 (1 - 3 \text{sen}^2 \bar{\varphi}) \quad (\text{mGal}) \quad (13)$$

onde g^T refere-se ao efeito permanente direto sobre a gravidade, e γ e δ representam os fatores clinométrico e gravimétrico – infelizmente esta notação, já consolidada na literatura, é similar à usada para outras grandezas geodésicas. Torge (id., ibid.) menciona os seguintes valores associados às componentes semi-diurnas: $h_2=0,60$, $k_2=0,30$, $\gamma_2=0,69$ e $\delta_2=1,15$. No contexto sul-americano, Freitas

(1993) analisa o assunto sob o ponto de vista da adequação dos modelos estruturais da litosfera, e atribui importância crescente à modelagem da carga oceânica, em vista da igualmente crescente precisão das observações gravimétricas. Tal modelagem é ainda mais importante no caso de estudos desenvolvidos em regiões costeiras, como os relatados nesta Tese.

Lambeck (1988, p. 92-101, 577-596) discute extensamente o assunto, incluindo outros tipos de números de Love-Shida. No contexto desta Tese, é importante repetir que eles dependem do grau, ordem e frequência das componentes harmônicas da maré, passíveis, portanto, de determinação experimental – exceto para aqueles referentes à maré permanente, i. e., h_0 e k_0 , já que seu período infinito é, teoricamente, inobservável (HECK, 2004, p. 170-171). Com outras palavras, Ekman (1988, p. 16) afirma não ser possível a discriminação precisa entre o achatamento causado pela rotação da Terra e aquele originado pela maré permanente.

Esta, no entanto, é uma questão controversa, já que, em alguns contextos da pesquisa geodésica atual, são realizadas estimativas de h_0 e k_0 . Este é o caso, por exemplo, da rede de referência ITRF (próxima seção) e do modelo do geopotencial EGM96 (seção 2.2.4), nos quais os efeitos da maré permanente foram estimados com a utilização de h_2 e k_2 (HECK, 2004).

Ekman (1988) faz uma detalhada revisão da evolução cronológica dessas discussões, tomando como ponto de partida a proposta original de Honkasalo – restaurar a contribuição da maré permanente na correção de maré então vigente, equação (12). Com tal procedimento, são reduzidos os efeitos diretos e indiretos apenas dos termos periódicos, donde se origina a denominação “maré média” (*mean tide*). Esta estratégia de redução foi adotada, por exemplo, na realização do sistema gravimétrico IGSN-71 (Cap. 3). Mäkinen (2000) argumenta que as altitudes das redes de nivelamento em que as observações não são corrigidas dos efeitos das marés terrestres, como a RAAP, referem-se aproximadamente ao “geóide médio” (próxima seção). Resultados de ALTSAT também não são corrigidos da maré permanente, ou seja, o NMM dado pela técnica é deformado pela maré permanente (BOSCH, 2002). No entanto, a utilização deste conceito é incompatível com as formas tradicionais de modelagem do geopotencial (próxima seção).

Ekman (id.) menciona que esta incompatibilidade foi inicialmente tratada com o conceito “livre da maré” (*tide-free* ou *non-tidal*), que implica na total redução dos efeitos diretos e indiretos, incluindo os da maré permanente. Como já mencionado, ITRF e EGM96 incorporam este conceito. Cabe enfatizar que as coordenadas tridimensionais do SIRGAS referem-se ao ITRF e, portanto, correspondem implicitamente ao conceito “livre da maré”.

Além da impossibilidade conceitual referente à determinação precisa de h_0 e k_0 , a Terra “livre da maré” perderia o achatamento e teria sua velocidade angular alterada, dentre outras “violações inaceitáveis da realidade física” (EKMAN, id.). No entanto, McCarthy e Petit (2004, p. 9) confirmam que os ITRF são livres da maré apenas “por convenção”, pois os números de Love-Shida utilizados não correspondem aos que poderiam ser considerados “seculares”, e que, portanto, não correspondem rigorosamente à remoção total dos efeitos da maré permanente. Tais valores seculares corresponderiam à hipótese do corpo planetário em equilíbrio hidrostático, implicando nos chamados números de Love “fluidos” (e. g., EKMAN, id., p. 15; HECK, 2004): $h_f=1,93$ e $k_f=0,93$, resultando em um fator gravimétrico $\delta_f=1,53$ – significativamente diferente de δ_2 .

Como solução intermediária, surge, finalmente, o conceito de “maré zero” (*zero tide*), envolvendo a redução total dos efeitos diretos – incluindo, pois, a componente permanente –, e restringindo a redução dos efeitos indiretos às componentes periódicas. Com isso, a “crosta zero” é equivalente à “crosta média”, já que o deslocamento $\Delta r_{M_0S_0}$ não é levado em conta. Esta é a estratégia recomendada pela IAG, e adotada, por exemplo, nas redes gravimétricas modernas e no modelo europeu do geopotencial, EGG97 (MÄKINEN, 2000). Neste último caso, foi necessária uma correção referente à utilização dos longos comprimentos de onda do EGM96, “livre da maré”. A correção da “maré zero” nos levantamentos gravimétricos implica na utilização de um fator adicional $(\delta-1)$ na equação (13) (EKMAN, id., p. 17, eq. 22).

Os efeitos da adoção dos diferentes conceitos de tratamento da maré permanente são exemplificados na Tabela 3 (p. 36).

Assim, em vista da proposta de integração de diferentes técnicas e modelos geodésicos, é essencial identificar a estratégia de tratamento dos efeitos da maré permanente utilizada em cada um deles, e implementar procedimentos para a necessária compatibilização. Para tanto, tal identificação deve se iniciar nos próprios sistemas geodésicos de referência utilizados. Uma apresentação resumida dos conceitos básicos associados aos referenciais geométricos simplificados é feita a seguir.

2.2.3 – Referência geométrica

Em decorrência das discussões anteriores (seção 2.2.1), a adoção de um sistema de referência vinculado ao geopotencial é natural em qualquer aplicação onde o posicionamento espacial seja necessário. A introdução de modelos geodésicos mais simplificados, como o elipsóide de revolução, justifica-se em contextos como o do posicionamento horizontal ou tridimensional. Nestes, os benefícios dessa simplificação superam amplamente as vantagens decorrentes da eventual manutenção de um modelo mais fiel à Terra real (TORGE, 2001, p. 104).

Os chamados sistemas de referência terrestres (TRS, em alusão à expressão inglesa *terrestrial reference systems*) baseiam-se na utilização de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) com origem no centro de massa terrestre, ou geocentro (TORGE, 2001, p. 32). Além da origem no geocentro, a definição dos TRS inclui a orientação do eixo Z, segundo o eixo médio de rotação da Terra, e do eixo X, de acordo com o meridiano médio de Greenwich – com a conseqüente definição do eixo Y de modo a completar um sistema tri-ortogonal destrógiro. Assim, os TRS são sistemas dotados de rotação, segundo a velocidade angular média ω da Terra.

Coordenadas assim definidas são utilizadas no refinamento periódico da materialização do chamado *International TRS* (ITRS) mediante sucessivas (e ligeiramente diferentes) configurações da Rede Internacional de Referência Terrestre, mais conhecida por sua sigla inglesa ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), cujos detalhes fogem ao escopo desta Tese (MCCARTHY, PETIT, 2004). O ITRF-2005 é a última materialização do ITRS – ou realização, de acordo com a terminologia adotada nos últimos anos (id., p. 36; DREWES et al., 2007). Por outro lado, o sistema geodésico unificado do continente americano

(SIRGAS, Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) teve coordenadas referidas ao ITRF-1994 em sua primeira realização, e, na segunda realização, ao ITRF-2000.

Com freqüência, as coordenadas cartesianas são inconvenientes, por serem destituídas de um caráter geométrico que represente, mesmo que aproximadamente, a superfície terrestre, além de não propiciarem uma clara distinção entre a posição horizontal e a altitude (SEEBER, 2003, p. 23). A alternativa mais usual para contornar essa inconveniência é a adoção de coordenadas referidas ao elipsóide de revolução (ou bi-axial), definido por seus semi-eixos maior a e menor b , dos quais se obtém o achatamento f (da expressão inglesa *flattening*):

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (14)$$

Torge (2001, p. 91) menciona o uso preferencial do achatamento em substituição ao semi-eixo menor na parametrização do elipsóide, em função de ser uma grandeza numericamente menor e, conseqüentemente, mais adequada à representação por séries. Este é apenas um dos muitos exemplos desse tipo de procedimento na Geodésia, conforme explicitado na próxima seção.

Cabe lembrar que o elipsóide de revolução foi proposto por Newton, no século XVII, como figura de equilíbrio hidrostático para uma esfera fluida e homogênea em rotação – hipótese posteriormente confirmada por evidências observacionais (TORGE, 2001, p. 8). O mesmo conceito de equilíbrio hidrostático é usado no estudo dos efeitos das variações temporais do geopotencial (mas não mencionado na seção 2.2.2).

No elipsóide de referência assim estabelecido são definidas as chamadas coordenadas geodésicas (TORGE, 2001, p. 99): latitude geodésica Φ , longitude geodésica λ e altitude geométrica (ou elipsoidal) h . A Figura 7 ilustra os conceitos, incluindo a latitude geocêntrica $\bar{\Phi}$.

Outras grandezas importantes do elipsóide são as excentricidades linear (ε), primeira (e) e segunda (e'):

$$\varepsilon = \sqrt{a^2 - b^2} \quad , \quad e = \frac{\varepsilon}{a} \quad , \quad e' = \frac{\varepsilon}{b} \quad (15)$$

A importância do modelo elipsóidico é enfatizada ao se considerar o conceito de elipsóide equipotencial ou de Somigliana-Pizzetti (TORGE, 2001, p. 103). Além da clássica preocupação com o dimensionamento de a e b que resulte em um melhor ajuste às dimensões reais da Terra, a parametrização do elipsóide equipotencial inclui também seu esferopotencial U_0 (HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 110; TORGE, 2001, p. 106):

$$U_0 = \frac{GM}{\varepsilon} \arctan \frac{\varepsilon}{b} + \frac{\omega^2 a^2}{3} \quad (16)$$

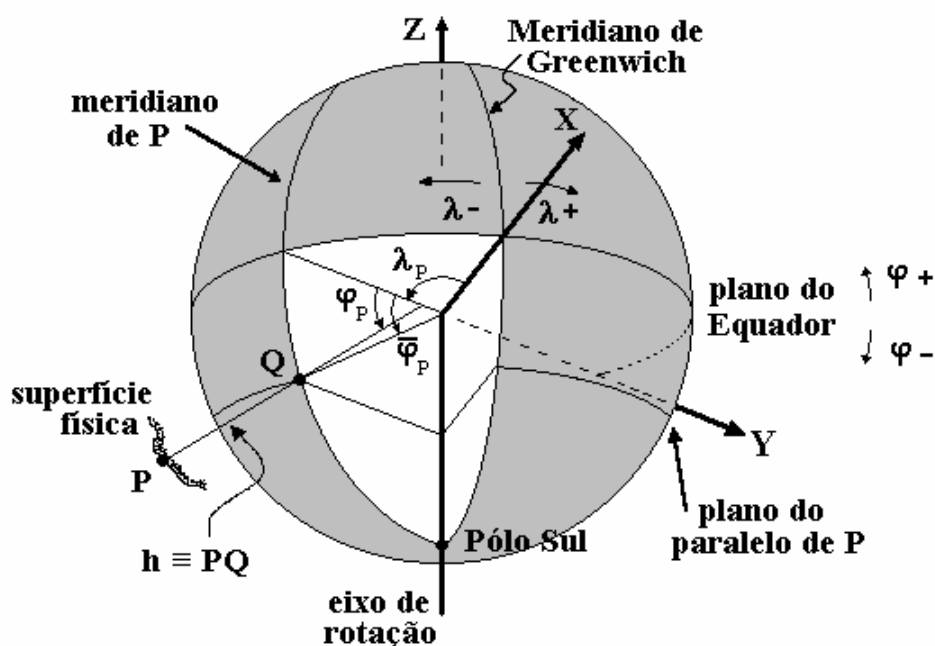


FIGURA 7 – COORDENADAS GEODÉSICAS

FONTE: adaptada de Torge (2001, p. 99)

Observa-se que esse potencial depende de apenas quatro parâmetros – a excentricidade ε é definida por meio de a e b –, atendendo ao teorema de Stokes-Poincaré (TORGE, 2001, p. 103). No entanto, além da constante gravitacional geocêntrica GM , da velocidade angular ω e do semi-eixo a , usualmente o

achatamento do modelo é parametrizado com o chamado fator dinâmico de forma J_2 (id., p. 109), ou achatamento dinâmico (COX, CHAO, 2002):

$$J_2 = \frac{1}{3} \left(2f - m - f^2 + \frac{2mf}{7} \right) \quad (17)$$

sendo

$$m = \omega^2 a^2 b / GM \quad (18)$$

O Quadro 1 mostra os valores assumidos por essas grandezas na definição dos Sistemas Geodésicos de Referência (SGR) de 1967 e 1980, mais conhecidos como GRS-67 e GRS-80 (da respectiva expressão inglesa).

QUADRO 1 – GRANDEZAS ASSOCIADAS AOS GRS-24/30, -67 E -80

| | símbolo | GRS-24/30 | GRS-67 | GRS-80 |
|---|------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| raio equatorial (m) | a | 6 378 388 ^(#1) | 6 378 160 ^(#1) | 6 378 137 ^(#1) |
| constante gravitacional geocêntrica ($10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$) | GM | | 398 603 ^(#1) | 398 600,5 ^(#1) |
| fator de forma dinâmica (10^{-6}) | J_2 | | 1 082,7 ^(#1) | 1 082,63 ^(#1) |
| velocidade angular (10^{-5} rad/s) | ω | | ^(#3) | 7,292 115 ^(#1) |
| 1 / achatamento geométrico | $1/f$ | 297,0 ^(#1) | | 298,257 222 101 |
| gravidade equatorial (m/s^2) | γ_a | 9,780 49 ^(#1) | | 9,780 326 7715 |
| gravidade polar (m/s^2) | γ_b | | | 9,832 186 3685 |
| achatamento gravítico | β | 0,005 2884 ^(#2) | | 0,005 302 440 112 |
| | β_1 | -0,000 0059 ^(#2) | | |
| primeira excentricidade | e^2 | | | 0,006 694 380 0229 |
| potencial normal no elipsóide | U_0 | | | 62 636 860,850 |
| | m | | | 0,00344978600308 |

FONTE: TORGE, 2001, p. 115-117

NOTA: (#1) grandezas definidoras; (#2) grandezas componentes da fórmula internacional da gravidade, definidora do GRS-24/30 juntamente com^(#1); (#3) valor não mencionado na resolução oficial: 7,292 115 1467

De forma similar à relação entre a gravidade terrestre e o geopotencial expressa pela equação (2), define-se o vetor gravidade normal $\underline{\gamma} = \text{grad } U$, cuja magnitude no elipsóide (γ_0) é dada, preferencialmente, pela fórmula de Somigliana (TORGE, 2001, p. 106):

$$\gamma_0 = \gamma_a \frac{1 + k \text{sen}^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \text{sen}^2 \varphi}}, \quad k = \frac{b \gamma_b}{a \gamma_a} - 1 \quad (19)$$

ou pela (não mais usada) fórmula da gravidade de Clairaut (id., p. 109):

$$\gamma_0 = \gamma_a (1 + \beta \text{sen}^2 \varphi + \beta_1 \text{sen}^2 2\varphi) \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\gamma_b - \gamma_a}{\gamma_a} \quad (21)$$

$$\beta_1 = \frac{f^2 - 5mf}{8} \quad (22)$$

sendo γ_a e γ_b os valores equatorial e polar da gravidade normal, e β o chamado achatamento gravítico. Tais grandezas foram utilizadas na definição da fórmula internacional da gravidade, que, juntamente com o elipsóide internacional de Hayford, constituiu o sistema de referência 1924/1930 (GRS-24/30), de acordo com Torge (2001, p. 115) – seus parâmetros definidores também são apresentados no Quadro 1.

Outra fórmula não mais utilizada para a gravidade normal é a de Helmert (1884, apud BOWIE, AVERS, 1914, p. 51):

$$\gamma_0 = 9,80624 (1 - \alpha_1 \cos 2\varphi + \alpha_2 \cos^2 2\varphi) \quad (23)$$

sendo $\alpha_1 = 0,002644$ e $\alpha_2 = 0,000007$ – parâmetros também utilizados na fórmula da correção normal-ortométrica, equação (57) (p. 52).

Groten (2004) apresenta estimativas “atualizadas” de alguns desses parâmetros, referentes às diferentes formas de tratamento da maré permanente (seção anterior). Tais estimativas são discutidas mais apropriadamente na próxima seção, em virtude de seu vínculo com os modelos do geopotencial.

Para finalizar esta seção, cabe ressaltar que a chamada aproximação esférica (HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 87) não se refere à substituição do elipsóide pela esfera. Como enfatizado na próxima seção, freqüentemente as grandezas geodésicas de pequeno valor absoluto são expressas sob a forma de séries de Taylor. Este é o caso, por exemplo, do achatamento geométrico. A aproximação esférica consiste no truncamento de seu desenvolvimento em série, levando a formulações aproximadas como a da gravidade normal:

$$\gamma = GM/r^2 \quad (24)$$

Apresentados estes conceitos básicos, é possível então voltar à discussão do geopotencial.

2.2.4 – Geopotencial e geóide

A superfície dos oceanos estabelece um claro limite ao domínio espacial das atividades humanas. Além disso, ao ocupar mais de 70% da superfície terrestre, oferece a mais abrangente aproximação de uma superfície equipotencial (VANÍCEK, KRAKIWSKY, 1986, p. 105). Isso foi explicitamente reconhecido por Gauss ao propor tal superfície como materialização geométrica da superfície terrestre:

“O que chamamos superfície terrestre nada mais é, em termos geométricos, que a superfície que intercepta a direção da gravidade segundo ângulos retos, e da qual faz parte a superfície dos oceanos” (GRAFAREND, 1994, p. 4).

Posteriormente, Johann Benedict Listing, assistente e sucessor de Gauss (O'CONNOR, ROBERTSON, 2007), propôs:

“(...) chamar aquela superfície matemática da Terra, da qual a superfície oceânica faz parte, de superfície geoidal da Terra, ou **geóide**” (GRAFAREND, 1994, p. 4).

No entanto, a “superfície oceânica” de Gauss e Listing corresponde a oceanos idealizados, homogêneos e em repouso, sujeitos apenas à força da gravidade (e. g., TORGE, 2001, p. 76). As mais claras “perturbações” de tal situação ideal são as variações de alta freqüência originadas na ação dos ventos, na atração luni-solar e no deslocamento de massas atmosféricas anômalas – i. e., ondas

(segundos), marés (horas) e “ressacas” (dias), conforme Pugh (1987, p. 10). Usualmente, considera-se que estes efeitos são eliminados recorrendo-se à média das observações de nível do mar por períodos suficientemente longos (ver 2.3). O nível médio do mar (NMM) assim obtido era tomado como base natural para a materialização da superfície de referência vertical das redes geodésicas clássicas em todo o mundo (e. g., TORGE, 2001, p. 82). Detalhes do caso brasileiro são apresentados no Capítulo 3.

Todavia, mesmo nas mais longas séries temporais, o NMM ainda apresenta desvios “semi-permanentes” em relação à superfície equipotencial – cujas causas incluem, por exemplo, o balanço geostrófico das correntes oceânicas e a diferença volumétrica (“efeito estérico”) entre as águas tropicais e polares (VANÍCEK, KRAKIWSKY, 1986, p. 105). Tais desvios são denominados topografia do NMM (TNMM), variam globalmente em até ± 2 m e são discutidos com mais detalhes na seção 2.3.

O conceito de TNMM é essencial para uma definição rigorosa do geóide, que elimine a subjetividade implícita na proposta original de Gauss e Listing. Tal definição rigorosa ajudaria a tornar possível a realização da referência vertical global de forma consistente com os níveis de precisão já alcançados pelas modernas técnicas geodésicas. Três alternativas são sugeridas por Mather (1978, p. 218 e p. 221) – reconhecendo que, em todas elas, as variações temporais do NMM e do próprio geóide levam à necessária inclusão de épocas de referência:

- a) a definição “geodésica” refere-se à situação anterior ao advento das observações globais e precisas do nível do mar (seção 2.3): geóide é a superfície em relação à qual é nula a média dos valores pontuais de TNMM nos marégrafos definidores dos *data* geodésicos verticais em todo o planeta;
- b) de acordo com uma definição “oceanográfica”, o geóide é a superfície em relação à qual é nula a média global da TNMM. Trata-se do refinamento mais natural do geóide de Gauss e Listing e, por isso, será discutido mais extensamente na seção 2.3;
- c) uma terceira definição surgiria no contexto dos chamados problemas de valor de contorno geodésico (PVCG): superfície em relação à qual é nulo o harmônico de

ordem zero da TNMM na solução dos PVCG. Uma apresentação sumária dos PVCG é feita em seguida;

Heck (2004, p. 169) inclui ainda outras duas propostas:

- d) uma definição “física” seria baseada na escolha (mais ou menos) arbitrária de um valor fixo para o geopotencial do geóide (W_0), como no caso do sistema vertical de referência europeu EVRS (EUREF, 2000, p. 101), em que o valor do potencial normal do elipsóide do GRS-80 $U_0 = 62\,636\,860,850 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (MORITZ, 2000a, p. 131) foi atribuído ao geopotencial W_0 ; e
- e) na definição “natural”, “geóide” seria a superfície de nível materializada por um ponto arbitrário.

Em contraposição às discussões sobre a natureza conceitual do geóide, diferentes “realizações” do geóide têm sido determinadas em escalas global e regional (e. g., LOBIANCO et al., 2005) fazendo uso das variadas formulações do PVCG, com base nos problemas de contorno da teoria do potencial:

“Determinar uma função harmônica μ no exterior de uma dada superfície quando são conhecidos os valores assumidos sobre a superfície: (a) pela função μ – problema de Dirichlet ; (b) pela derivada normal $d\mu/dn$ – problema de Neumann ; por uma combinação linear de μ e $d\mu/dn$ – problema de Hilbert” (GEMAEL, 2002, p. 52).

Funções harmônicas são aquelas que atendem à equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} = \nabla^2 \mu = \Delta \mu = 0 \quad (25)$$

Aplicando-se o operador de Laplace Δ à equação (3) (p. 19), observa-se que o potencial gravitacional externo W^G é harmônico, mas não o potencial centrífugo W^C . Tal dificuldade é resolvida com a definição do potencial anômalo, ou perturbador, T :

$$T = W - U = W^G - U^G \quad (26)$$

o qual é harmônico no exterior das massas terrestres, já que a parcela centrífuga é igual em W e U .

As soluções dos PVCG são usualmente representadas como composição dos chamados coeficientes harmônicos esféricos \bar{C}_{nm} de grau n e ordem m (RAPP, 1994, p. 59):

$$T = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^{+n} \bar{C}_{nm} \bar{Y}_{nm} \quad (27)$$

cuja discussão detalhada foge ao escopo da presente Tese. No entanto, alguns aspectos básicos devem ser ressaltados – a começar pela dificuldade acarretada pelas massas topográficas (entre geóide e SF), pois é necessário que a função em questão (T) seja harmônica no exterior da superfície considerada na formulação do problema (o geóide, neste caso). A forma usual de contornar tal dificuldade é apresentada posteriormente.

Outro aspecto a ser comentado refere-se à resolução espacial daquelas decomposições espectrais do campo da gravidade (TORGE, 2001, p. 74) quando truncadas no grau $N < \infty$, dada por $360^\circ / N$, e associada, usualmente, ao comprimento de onda $180^\circ / N$. Assim, por exemplo, modelos de grau e ordem 90 têm resolução de 4° , sendo capazes de representar feições de no mínimo 2° ($2 \times 110 \text{ km} = 220 \text{ km}$).

E, por fim, o significado dos coeficientes de baixo grau: o potencial GM/R da esfera de raio R é representado pelo coeficiente de grau 0 – que, no caso de T , é nulo, já que seu efeito é removido juntamente com U na equação (26). Os coeficientes de grau 1 referem-se à diferença entre o centro de massa e o centro do sistema de coordenadas, e são obviamente nulos para os sistemas geocêntricos. Finalmente, os de grau 2 representam principalmente o achatamento ($\bar{C}_{2,0} = -\bar{J}_2$), sendo responsáveis, assim, pela viabilidade da representação (aproximada) do campo elipsóidico com uma referência esférica.

A título de ilustração, a Tabela 2 apresenta os coeficientes dos modelos EGM96 (LEMOINE et al., 1998) e GGM-02C (TAPLEY et al., 2005).

TABELA 2 – COEFICIENTES DE GRAU<3, EGM96 E GGM-02C

| | EGM96 (10 ⁻⁰⁶) | GGM-02C (10 ⁻⁰⁶) |
|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| $\bar{C}_{2,-2}$ | -1,40016683654 | -1,4002662003867 |
| $\bar{C}_{2,-1}$ | 0,00119528012031 | 0,001396819537955 |
| $\bar{C}_{2,0} = -\bar{J}_2$ | -484,165371736 | -484,16938905481 |
| $\bar{C}_{2,1}$ | -0,000186987635955 | -0,000204583381847 |
| $\bar{C}_{2,2}$ | 2,43914352398 | 2,4393233001191 |

FONTE: LEMOINE et al., 1998; TAPLEY et al., 2005

NOTA: a barra sobre os símbolos indica coeficientes plenamente normalizados; os coeficientes C de ordem negativa equivalem aos coeficientes S (dos termos com a função seno) das formas alternativas ($0 < m < +n$) da equação (26)

Grotten (2004) faz uma revisão das estimativas mais atuais (Tabela 3) dos parâmetros definidores do GRS-80, correlacionando-os com respectivos valores no EGM96, e aponta algumas inconsistências entre eles. Posteriormente, Ihde (2007) discute tais inconsistências no contexto de um sistema global de referência vertical (seção 2.3).

O recurso ao conceito de potencial anômalo tem a vantagem adicional de permitir a representação do geopotencial como composição de uma componente principal (U), expressa por fórmulas analíticas, e uma componente residual (T) passível de aproximação linear (MORITZ, 1980, p. 13). Este mesmo autor (op. cit., p. 14) afirma que, de forma mais geral, todas as relações entre grandezas referentes ao potencial anômalo são linearizáveis, mediante truncamento das respectivas séries de Taylor.

TABELA 3 – ESTIMATIVAS “ATUALIZADAS” DE ALGUNS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS

| | a (m) | $1/f$ |
|------------------|---------------------|---------------------|
| <i>Mean tide</i> | 6 378 136,72 ± 0,10 | 298,25231 ± 0,00001 |
| <i>Zero tide</i> | 6 378 136,62 ± 0,10 | 298,25642 ± 0,00001 |
| <i>Tide-free</i> | 6 378 136,59 ± 0,10 | 298,25765 ± 0,00001 |

FONTE: GROTTEN, 2004

Analogamente ao potencial perturbador, outros conceitos geodésicos importantes são definidos como diferenças entre grandezas referentes aos campos real e normal, como a altura geoidal N e a anomalia da gravidade Δg (id., ibid.):

$$N = h_p - H_p^{ort} \quad (28)$$

$$\Delta g = g_{P_0} - \gamma_{Q_0} \quad (29)$$

sendo H_p^{ort} e h_p as altitudes ortométrica e geométrica do ponto P na superfície física (SF) terrestre, g_{P_0} o valor da gravidade na projeção de P sobre o geóide ao longo de sua vertical (projeção de Pizzetti) e γ_{Q_0} o valor da gravidade normal na projeção de P sobre o elipsóide ao longo de sua normal (projeção de Helmert). A Figura 8 ilustra estes e outros conceitos.

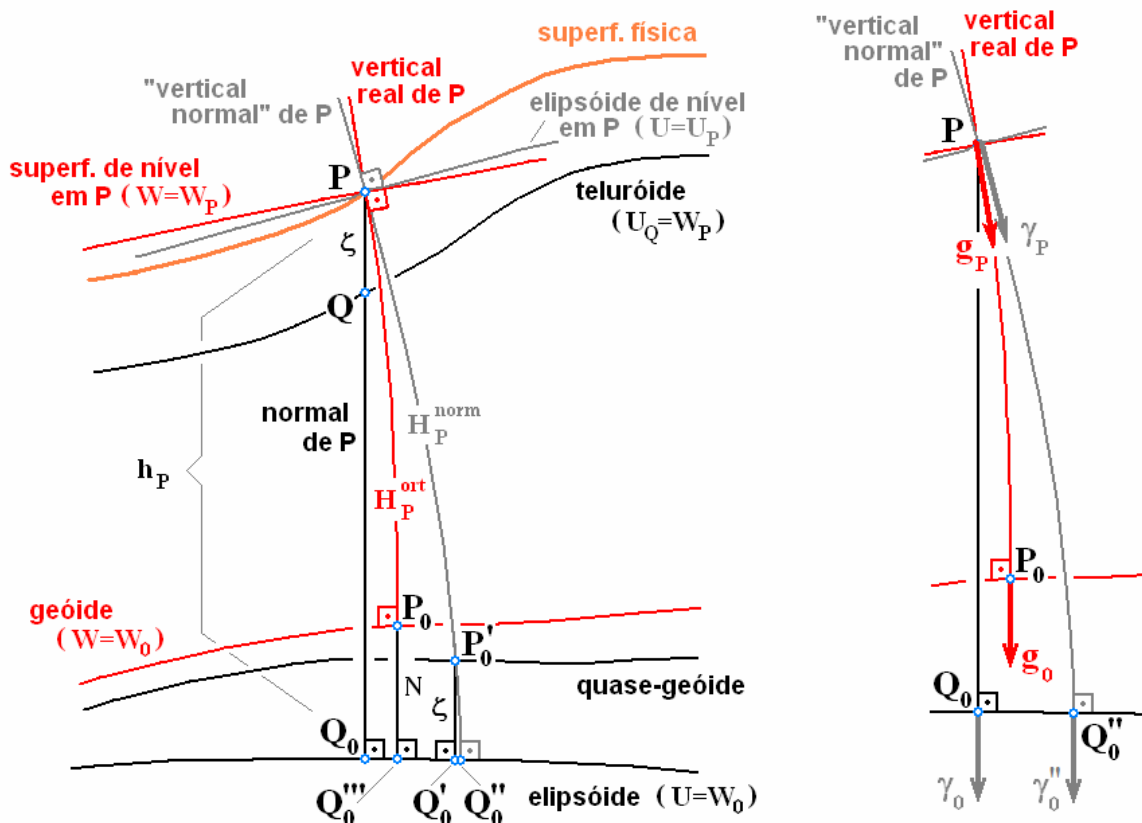


FIGURA 8 – ELEMENTOS ENVOLVIDOS NO PVCG

FONTE: adaptada de Moritz (1980, pp. 9 e 13), Sideris (1994, p. 80) e Torge (2001, p. 216-217)

NOTA: "vertical normal" denota a vertical do campo da gravidade normal

Potencial anômalo e anomalia da gravidade relacionam-se segundo a equação fundamental da Geodésia Física (HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 86):

$$\frac{\partial T}{\partial h} - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial h} T + \Delta g = 0 \quad (30)$$

na qual se reconhece uma combinação linear da função harmônica T com sua derivada normal (em relação ao elipsóide), ou seja, ela expressa o terceiro problema de valor de contorno da teoria do potencial (também conhecido como problema de Hilbert ou, ainda, de Poincaré). A aplicação da aproximação esférica – equação (24) (p. 32) – à segunda parcela leva à expressão simplificada:

$$\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{2}{R} T + \Delta g = 0 \quad (31)$$

cuja solução para uma superfície esférica resulta na clássica fórmula de Stokes:

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \quad (32)$$

Nesta, σ indica a superfície sobre a qual é feita a integração – usualmente, a superfície de referência das anomalias Δg –, e $S(\psi)$ é a chamada função de Stokes, cuja discussão foge ao escopo desta Tese.

Expressão similar para a altura geoidal N pode ser obtida mediante a aplicação da fórmula de Bruns:

$$N = T/\gamma \quad (33)$$

A fórmula de Stokes constitui a base da chamada determinação gravimétrica do geóide, a partir das anomalias da gravidade. Estas, por sua vez, têm o importante inconveniente da necessidade de redução, da SF ao geóide, do valor observado da gravidade. Tal necessidade decorre não apenas da definição de anomalia, mas também da eliminação da topografia (massas exteriores ao geóide) em atendimento à condição de aplicação da equação de Laplace (função harmônica). Além de recorrer a hipóteses simplificativas acerca da distribuição de densidades na crosta, aquela redução introduz uma indesejável dependência em relação ao sistema local de altitudes. Por sua vez, o pressuposto de inexistência de massas exteriores é

incompatível com a própria existência da Lua e do Sol, cujas massas dão origem à chamada maré permanente – como discutido na seção 2.2.2.

Uma das possíveis formas de contornar estes problemas foi proposta pelo geodesta, geofísico e astrônomo russo Mikhail Sergeevich Molodensky (HEIFETS, 2000) em 1945: adotar a própria SF como superfície limitante no PVCG, em vez do geóide (HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 291). Para tanto, introduz-se uma primeira aproximação da SF (Figura 8), na qual o potencial normal U_Q é igual ao geopotencial W_P na SF, e cuja distância vertical em relação ao elipsóide constitui a chamada altitude normal (discutida na seção 2.2.6). Esta superfície aproximativa foi denominada teluróide, e serve de base para a redefinição da anomalia de gravidade como a diferença entre a própria gravidade observada na SF (ponto P) e a gravidade normal no teluróide (ponto Q). Está além dos objetivos desta Tese uma abordagem mais detalhada da teoria de Molodensky, que pode ser encontrada, por exemplo, em Moritz (1980, p. 330; 2000b).

Sjöberg (1994, pp. 36-39) discute outras formas de evitar a necessidade da redução da gravidade ao geóide nos chamados PVCG livres, i. e., aqueles em que a superfície de contorno não é conhecida, tais como os problemas de Stokes e Molodensky. O mesmo autor menciona a crescente importância dos PVCG fixos – nos quais a superfície limitante é considerada conhecida – em decorrência da também crescente disponibilidade de técnicas espaciais que provêm tal conhecimento. Moritz (2000b, p. 70) menciona esta classe de problemas como “PVC do GPS”. Tal caracterização é complementada por Fei (2000, p. 37), ressaltando que o conhecimento prévio da superfície limitante remete ao segundo PVC da teoria do potencial, e analisando aspectos avançados de sua solução.

De modo análogo à fórmula de Stokes para o PVCG livre, uma solução do PVCG fixo para uma superfície esférica é dada pela fórmula de Hotine (SJÖBERG, *ibid.*), também denominada Neumann-Koch (MORITZ, 2000b, p. 74):

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \delta g H(\psi) d\sigma \quad (34)$$

na qual δg representa o distúrbio da gravidade, definido como a diferença entre os valores real e normal da gravidade no mesmo ponto da SF:

$$\delta g = g_p - \gamma_p \quad (35)$$

Freitas et al. (2007) enfatizam a utilização do distúrbio da gravidade, sua relação com a teoria de Molodensky, e sua importância em vista da independência de reduções e do sistema de altitudes. Ressaltam também a importância das formulações dos PVCG em termos das componentes do desvio da vertical:

$$\xi = -\frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial \varphi} \quad ; \quad \eta = -\frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial N}{\partial \lambda} \quad (36)$$

(e. g., HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 112) considerando a alta precisão com que se obtém N ao longo das trilhas de altimetria por satélites (ALTSAT), como discutido na seção 2.3.

Em adição à ALTSAT, outras técnicas espaciais contribuem de forma importante para a determinação do geóide, ressaltando-se a análise das perturbações sofridas pelos satélites ao longo de suas órbitas. Até poucos anos, esta técnica era responsável pela determinação dos longos comprimentos de onda (SJÖBERG, 1994, p. 40), isto é, dos coeficientes de baixos e médios graus, representando o efeito de feições geológicas profundas, como anomalias de densidade e correntes de convecção no manto terrestre (TORGE, 2001, p. 346). As técnicas baseadas em dados terrestres, apresentadas anteriormente, discriminam os efeitos regionais (p. ex., convergência ou divergência de placas tectônicas) e locais (e. g., domos de sal), isto é, os pequenos comprimentos de onda representados pelos coeficientes de alto grau e ordem. Tal panorama vem sofrendo uma grande alteração com o advento, nos últimos anos, das missões espaciais projetadas especificamente para o estudo do campo da gravidade, apresentadas por, e. g., Lobianco (2005, p. 118).

Outro aspecto a ser destacado diz respeito à utilização de altitudes elipsoidais, derivadas de levantamentos GNSS, no cálculo de modelos do geopotencial. Quando tais altitudes referem-se a pontos que também dispõem de altitudes físicas rigorosas, a comparação entre os dois tipos de altitude constitui uma importante etapa de avaliação dos resultados da aplicação dos modelos matemáticos citados anteriormente (e. g., FEATHERSTONE, 2001; e, no contexto brasileiro, LOBIANCO et al., 2005; LOPES, 2006, o qual aborda especificamente o

contexto desta Tese). Por outro lado, a interpolação direta das diferenças entre altitudes geométricas e aquelas obtidas das redes de nivelamento, sem a consideração de informações sobre o campo da gravidade, não resulta em um “geóide”, mas apenas em uma superfície corretora que modela tal sistema altimétrico em relação ao elipsóide (FEATHERSTONE, 1998). Uma superfície assim definida poderia contribuir para a minimização dos impactos, sobre os usuários do SGB, da eventual adoção de um novo sistema vertical.

Um aspecto comum a todas as alternativas discutidas anteriormente é a necessidade de integração de informações de diferentes fontes. Não apenas as observações geodésicas, mas também os modelos físicos, numéricos e estatísticos, utilizados direta e indiretamente na solução dos PVCG, têm grande diversidade. Alguns desses componentes são tratados como grandezas discretas (e. g., as observações geodésicas), outras como contínuas – a exemplo da própria integral de Stokes. A modelagem dos erros pode não apresentar dificuldades, ou ser extremamente complexa. Tais dificuldades fizeram da Geodésia Física o ambiente ideal para o desenvolvimento e a discussão de métodos matemáticos avançados, como a colocação por mínimos quadrados. Foge aos objetivos desta Tese a discussão detalhada deste e de outros daqueles métodos; no entanto, a colocação tem aplicação direta no problema da integração de informação gravimétrica ao nivelamento geométrico. Assim, seus aspectos básicos são sintetizados a seguir.

2.2.5 – Colocação por mínimos quadrados

Em Análise Matemática, o termo colocação se refere à estimação “de uma função desconhecida por meio de uma função aproximativa, ajustada a um conjunto de observações discretas de funcionais (derivadas, integrais etc) da função desconhecida” (MORITZ, 2006). Em contraposição, denomina-se interpolação ao caso em que os valores conhecidos se referem à própria função. Assim, a obtenção do geopotencial a partir de medidas da gravidade é um caso típico de colocação.

De fato, o desenvolvimento da chamada colocação por mínimos quadrados (LSC, do inglês *least squares collocation*) se deu no contexto da Geodésia Física, sob impulso do matemático e geodesta dinamarquês Torben Krarup. “Posteriormente desenvolveu suas idéias como uma teoria da 'Geodésia Integrada',

em que medidas físicas e geométricas seriam tratadas segundo modelo matemático e implementação computacional únicos” (TSCHERNING, 2006). Sansò (2002, p. 597) afirma que “esta é uma tendência geral da Ciência, sendo necessário compreender e ensinar mais fenômenos com menos fórmulas”.

Seguindo Moritz (1980, p. 132), Torge (2001, p. 303) e Egli et al. (2007), no caso da LSC tal modelo matemático unificado assume a forma geral:

$$\underline{\ell} = \underline{Ax} + \underline{s} + \underline{n} \quad (37)$$

representada na Figura 9, sendo $\underline{\ell}$ o vetor das observações, nos \underline{r} pontos observados, do fenômeno composto pela parcela sistemática \underline{Ax} e pelo sinal aleatório contínuo \underline{s} (com média nula), além dos erros de observação \underline{n} , também aleatórios porém discretos. A função determinística linear (ou linearizada) \underline{Ax} é produto da matriz das derivadas parciais $A = \partial\ell/\partial x$ pelo vetor dos parâmetros \underline{x} .

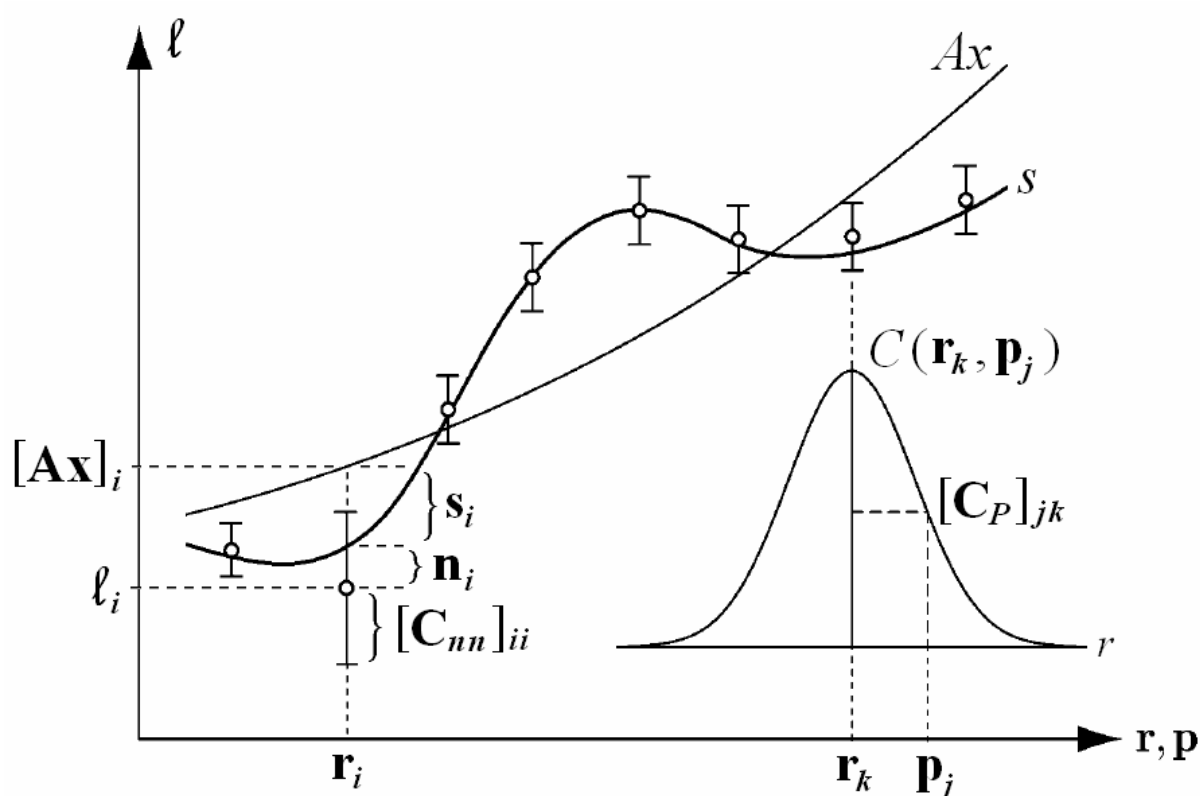


FIGURA 9 – ELEMENTOS BÁSICOS DA COLOCAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS

FONTE: adaptada de Moritz (1980, p. 133) e Egli et al. (2007)

O ajustamento das observações leva à solução:

$$\underline{\mathbf{x}} = \left(\underline{\mathbf{A}}^T \underline{\mathbf{C}}^{-1} \underline{\mathbf{A}} \right)^{-1} \underline{\mathbf{A}}^T \underline{\mathbf{C}}^{-1} \underline{\ell} \quad (38)$$

sendo $\underline{\mathbf{C}} = \underline{\mathbf{C}}_{ss} + \underline{\mathbf{C}}_{nn}$, soma das matrizes variância-covariância (MVC) dos sinais e dos ruídos (erros de observação), supostas independentes. No caso em que não haja sinal estocástico, o modelo matemático se reduz ao ajustamento paramétrico tradicional (e. g., GEMAEL, 1994, p. 115), cuja aplicação às redes verticais é discutida na seção 2.3.3.4 (p. 76).

Após este ajustamento, a predição do sinal nos $\underline{\mathbf{p}}$ pontos não observados é expressa por:

$$\underline{\hat{\mathbf{s}}} = \underline{\mathbf{C}}_p^T \underline{\mathbf{C}}^{-1} (\underline{\ell} - \underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{x}}) \quad (39)$$

sendo $\underline{\mathbf{C}}_p$ as covariâncias cruzadas do sinal nos pontos observados e não observados.

No caso da predição por mínimos quadrados, não há parâmetros a ajustar, e o modelo se reduz a:

$$\underline{\hat{\mathbf{s}}} = \underline{\mathbf{C}}_p^T \underline{\mathbf{C}}^{-1} (\underline{\mathbf{s}} + \underline{\mathbf{n}}) \quad (40)$$

Este é o caso do programa PREDGRAV de interpolação fornecido pelo GT-III / SIRGAS (SÁNCHEZ, 2005), em que $(\underline{\mathbf{s}} + \underline{\mathbf{n}})$ são as próprias anomalias Bouguer.

A escolha da função covariância é uma das etapas críticas da LSC. No caso da interpolação de valores de gravidade, as dificuldades são superadas com o uso das formas locais já consolidadas:

$$C(d) = C_0 / \left[1 + (d/B)^2 \right] \quad (41)$$

ou

$$C(d) = C_0 e^{-B^2 d^2} \quad (42)$$

sendo d a distância entre o ponto de interpolação e os pontos de observação selecionados, e C_0 e B os parâmetros descritores da função covariância. Seu significado é exemplificado na Figura 10. C_0 é o valor de $C(d)$ para d nula,

denominado variância. B é a chamada distância de correlação entre os pontos de interpolação e de observação, acima da qual Torge (2001, p. 226) afirma serem “não realistas os resultados da predição com LSC”.

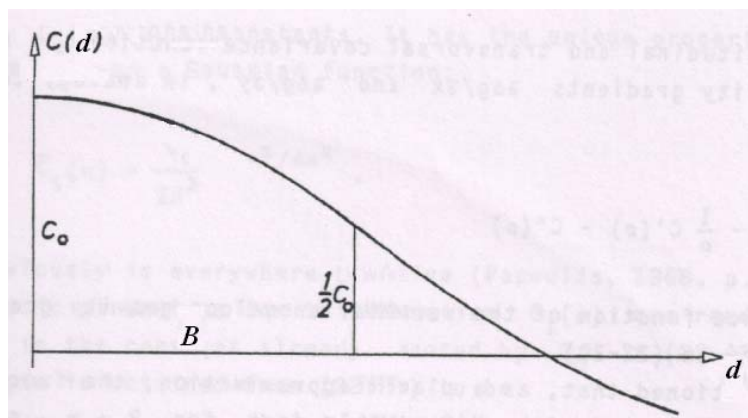


FIGURA 10 – FORMA GERAL DAS FUNÇÕES COVARIÂNCIA LOCAIS
 FONTE: MORITZ, 1980, p. 175

Sánchez (op. cit.) apresenta os detalhes do cálculo da função covariância no PREDGRAV, justificando a escolha das anomalias de Bouguer em função de sua adequação ao processo de ajustamento dos parâmetros C_0 e B , além de atenderem ao critério de média nula para o sinal. No entanto, o programa não fornece informações a respeito destes últimos, que poderiam contribuir para a avaliação dos resultados. Em vez disso, PREDGRAV fornece somente os desvios-padrão dos valores interpolados, que devem ser comparados com os limites dados na Tabela 4.

TABELA 4 – PRECISÃO NECESSÁRIA PARA INTERPOLAÇÃO DE GRAVIDADE

| altitude (m) | precisão (10^{-5} m/s^2) |
|--------------|--------------------------------------|
| 10 | 400 |
| 20 | 200 |
| 50 | 80 |
| 100 | 40 |
| 500 | 8 |
| 1000 | 4 |
| 2000 | 2 |
| 4000 | 1 |

FONTE: SÁNCHEZ, 2005, p. 14

2.2.6 – Posicionamento vertical

Nas seções anteriores, discutiu-se o geopotencial como parametrizador do posicionamento vertical e o geóide como superfície de referência natural. Em outras palavras, sistemas geodésicos verticais rigorosos devem ser materializados por conjuntos de altitudes vinculadas ao campo da gravidade terrestre. Tais altitudes físicas (H) atendem a paradigmas intuitivos que relacionam conceitos como “alto” e “baixo” ao fluxo de água (TORGE, 2001, p. 81). A elas contrapõem-se as altitudes referidas a modelos elipsoidais, dotadas de significado puramente geométrico (seção 2.2.3). Enquanto as primeiras são obtidas por nivelamento geométrico associado a observações gravimétricas (seção 2.3), as altitudes geométricas (h) resultam diretamente da aplicação das técnicas espaciais de posicionamento tridimensional – tais como aquelas associadas aos GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*).

Assim, o geopotencial é a base para definição de coordenadas verticais. No entanto, o valor do geopotencial no geóide não é nulo. Para de fato referir a coordenada vertical ao geóide, a IAG recomendou em 1954 a adoção do chamado número geopotencial C , definido como a diferença entre os geopotenciais no geóide e no ponto considerado. A partir da equação (5):

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B g \, dH \approx \sum_{i=1}^K (g_m^{obs} \Delta H^{obs}) \quad (43)$$

sendo g_m^{obs} a média dos valores observados da gravidade em cada par de pontos nivelados (seção), ΔH^{obs} o respectivo desnível observado, e K o número total de seções (e. g., TORGE, 2001, p. 208). Na prática, é preferível o cálculo das diferenças de geopotencial ΔC_{AB} , desde que a distância AB seja suficientemente pequena:

$$\Delta C_{AB} = C_B - C_A = - (W_B - W_A) \approx g_{AB}^{obs} \Delta H_{AB}^{obs} \quad (44)$$

cujo ajustamento adequadamente injuncionado resulta nos números geopotenciais. A Figura 11 ilustra estes e os próximos conceitos. Detalhes da integração numérica presente nas equações (43) e (44) são discutidos na seção 2.3.3.3 (p. 75).

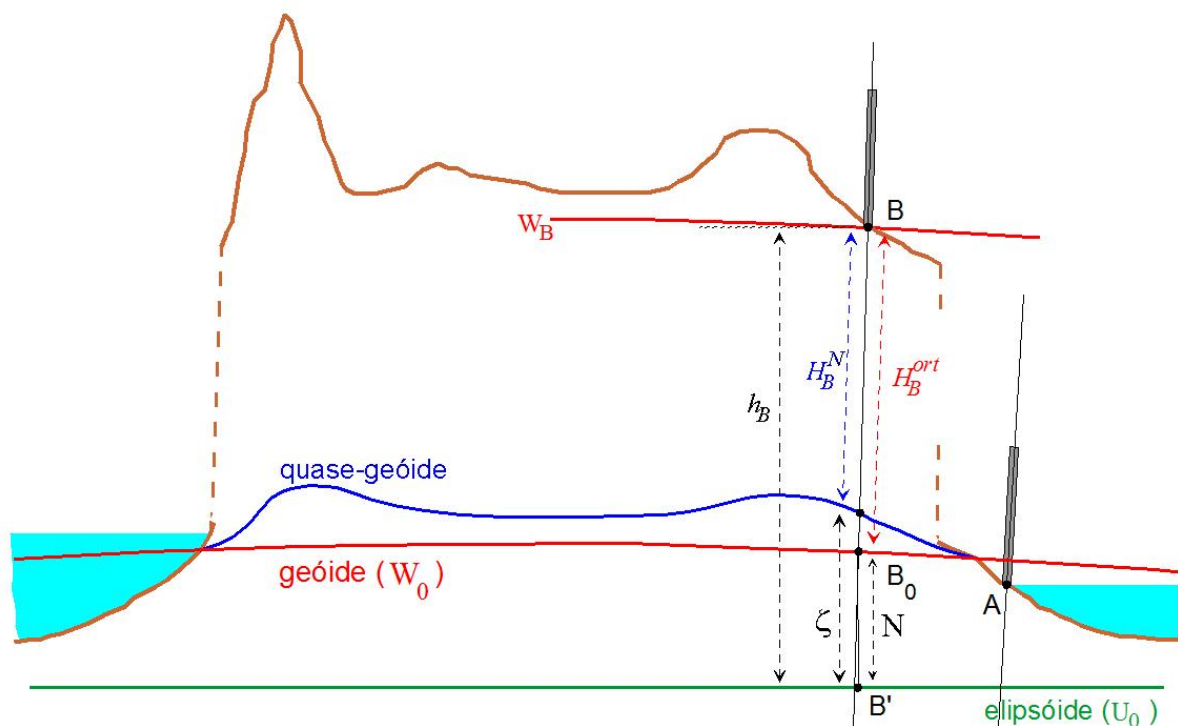


FIGURA 11 – ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA DEFINIÇÃO DAS ALTITUDES FÍSICAS

FONTE: adaptada de Freitas, Blitzkow (1999, p. 48), Torge (2001, p. 216), e Vaníček, Krakiwsky (1986, p. 367)

O grande problema para a adoção dos números geopotenciais como descritores rigorosos da posição vertical é a unidade em que devem ser expressos – kilocal x metro (gpu, de *gravity potential unit*), de acordo com Vaníček, Krakiwsky (1986, p. 368), ou $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$, em unidades do SI. Da necessidade de contornar esse problema, surgem diferentes tipos de altitudes físicas, resultantes da conversão de C para unidades de comprimento, dividindo-o por valores específicos de gravidade:

$$H^{física} = \frac{C}{g} \quad (45)$$

Assim procedendo, mantém-se a importante característica de respeitar o significado intrínseco de altitude, pois as altitudes físicas refletem, em maior ou menor grau, o paradigma de que "a água flui do ponto mais alto para o mais baixo". Em outras palavras, as altitudes físicas são aproximações satisfatórias da relação hidrostática vinculada à diferença de nível oriunda da diferença de geopotencial entre dois pontos.

Define-se altitude ortométrica (H^{ort}) como a distância do geóide ao ponto, sobre a linha vertical. Integrando-se, entre o geóide e a superfície física, a diferença entre os geopotenciais de duas superfícies equipotenciais separadas por uma distância infinitesimal, obtém-se (TORGE, 2001, p. 82):

$$C_B = \int g dH = g_m \int dH \quad \therefore \quad H_B^{ort} = \frac{C_B}{g_m} \quad (46)$$

sendo g_m o valor médio da gravidade entre o geóide e a superfície física, ao longo da vertical (B_0 e B, na Figura 11).

A diferença entre as altitudes elipsoidal e ortométrica é a altura geoidal:

$$N_B \approx h_B - H_B^{ort} \quad (47)$$

O efeito da não colinearidade de H e h é desprezível. O caso extremo de uma altitude de 10 km e um desvio da vertical de 1', implica em um erro menor que 1 mm (JEKELI, 2000, p. 15).

Expressando o desnível ortométrico (ΔH^{ort}), entre dois pontos A e B, com base no desnível observado (ΔH^{obs}):

$$\Delta H_{AB}^{ort} = \Delta H_{AB}^{obs} + \delta H_{AB}^{ort} \quad (48)$$

surge a correção ortométrica δH^{ort} (TORGE, 2001, p. 251):

$$\delta H_{AB}^{ort} = \int_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} dH + \frac{g_{m_A} - \gamma_0}{\gamma_0} H_A^{ort} - \frac{g_{m_B} - \gamma_0}{\gamma_0} H_B^{ort} \quad (49)$$

em que γ_0 é a gravidade normal no elipsóide (seção 2.2.3).

Após alguma manipulação, Hwang e Hsiao (2003) apresentam uma forma simplificada para a correção ortométrica:

$$\delta H_{AB}^{ort} \approx \frac{1}{g_{m_B}} (g_{AB}^{obs} - g_{m_B}) \Delta H_{AB}^{niv} + H_A^{ort} \left(\frac{g_{m_A}}{g_{m_B}} - 1 \right) \quad (50)$$

Já que é impossível inferir, no estágio atual do desenvolvimento científico, a distribuição de densidades no interior da crosta – e, conseqüentemente, o valor médio da gravidade (FREITAS, BLITZKOW, 1999) –, a obtenção exata das altitudes

ortométricas ainda não é possível. Valores aproximados desse tipo de altitude resultam da aplicação de modelos simplificados da distribuição de densidades litosféricas. Por exemplo, o chamado gradiente de Poincaré-Prey, $-0,0848$ miligal/m, surge da combinação da densidade crustal média ($2,67 \text{ g/cm}^3$) com o gradiente vertical da gravidade normal, $-0,3086$ miligal/m (GEMAEL, 2002, p. 216). Aplicando-se o gradiente de Poincaré-Prey para reduzir a gravidade observada na superfície física (g^{obs}) ao ponto médio ($H^{niv}/2$) entre esta e o geóide, obtém-se um valor aproximado (g_m^{PP}) da gravidade média g_m , usado nas altitudes de Helmert (H^H):

$$H^H = \frac{C}{g_m^{PP}} = \frac{C}{g^{obs} + 0,0424 H^{niv}} \quad (51)$$

Jekeli (2000, p. 8) menciona a necessidade de um processo iterativo nesta expressão, substituindo H^{niv} pelo valor calculado de H^H até sua convergência.

No caso do sistema vertical da América do Norte (NAVD-88), as diferenças de geopotencial são ajustadas e, com base nos números geopotenciais assim ajustados, são calculados dois tipos de altitude, sendo uma delas a ortométrica de Helmert (ZILKOSKI et al., 1992, p. 135).

Allister e Featherstone (2001) implementaram uma alteração das altitudes de Helmert, considerando valores mais realísticos da densidade. Para duas regiões separadas por uma falha geológica no sudoeste da Austrália, foram consideradas densidades de $2,42 \text{ g/cm}^3$ e $2,9 \text{ g/cm}^3$. Com isso, obtêm-se os valores $0,0528$ e $0,0327$ para o coeficiente de H^{niv} no denominador de (51). Os resultados não mostraram diferenças significativas. No entanto, tratou-se de um experimento com uma linha de nivelamento de apenas 14 km , com altitudes menores que 200 m .

Já Hwang e Hsiao (2003), para a rede fundamental (1010 RRNN, 2.000 km) de Taiwan, utilizaram um modelo de variações laterais da densidade em malha regular de $5'$. Neste modelo, os valores situam-se entre menos de $2,0 \text{ g/cm}^3$ e $3,08 \text{ g/cm}^3$, respectivamente correspondentes às planícies costeiras e ao maciço montanhoso na parte central do país. A correção de Helmert original (δH^H), obtida com a substituição de g_m por g_m^{PP} em (50), foi comparada com diferentes versões, considerando variações das densidades (segundo o modelo descrito) e dos

gradientes das anomalias da gravidade. Seus resultados mostraram que as variações de densidade não introduzem diferenças significativas, em relação à correção de Helmert original. Por outro lado, diferenças de até 15 cm surgem da utilização dos gradientes das anomalias da gravidade, para altitudes acima de 3.500 m. Para os circuitos que incluem as linhas com essas variações de altitude, o erro de fechamento foi significativamente melhorado, com qualquer uma das versões da correção de Helmert, em relação aos desníveis não corrigidos – p. ex., de 11,8 cm para 2,2 cm, e de 6,6 cm para 1,3 cm.

Tenzer et al. (2005) apresentam uma proposta numérica, mais laboriosa, para estimar a gravidade média g_m . A gravidade real é decomposta em parcelas referentes à gravidade normal, ao distúrbio da gravidade gerado pelas massas interiores ao geóide, e à atração determinada pelas massas acima do geóide (atmosfera e topografia). É nesta última que se utiliza um modelo de distribuição de anomalias laterais da densidade crustal, juntamente com os efeitos da calota de Bouguer e da correção de terreno.

Além da discussão sobre a viabilidade e exatidão de sua obtenção numérica, as altitudes ortométricas caracterizam-se por não tornar clara a condição de que as superfícies equipotenciais são superfícies de nível – com elas, diferentes pontos de uma única superfície equipotencial podem possuir valores diferentes de altitude no sentido puramente geométrico. Para melhor abordar a questão, basta lembrar do não paralelismo das equipotenciais, que resulta na interessante situação (TORGE, 2001, p. 58) em que duas equipotenciais separadas por 100 m no Equador mostram, nos pólos, uma separação de apenas 99,5 m – i. e., uma diferença de 50 cm. Isso leva a um importante questionamento: seria necessário rever a conceituação de ALTITUDE, explicitando a necessidade de obedecer à condição de nível das superfícies equipotenciais? Em outras palavras, o significado físico das altitudes não seria mais importante que sua interpretação geométrica?

Da tentativa de contornar o problema da obtenção da gravidade média g_m , substituindo-a por outros valores, surgem outros tipos de altitudes físicas. A seguir são discutidos os principais desses tipos – uma revisão abrangente pode ser encontrada em Sánchez (2005).

Para as altitudes dinâmicas (H^D), consideram-se valores constantes para o denominador da equação (45) (p. 46), escolhidos arbitrariamente – por exemplo, para o Brasil poderia ser escolhida a média dos valores de gravidade real na superfície física, ou o valor de gravidade normal para a latitude média do país, ou ainda um valor que minimizasse as diferenças na região do *Datum* de Imbituba ou as diferenças em todos os marégrafos:

$$H^D = \frac{C}{g^{arbitr}} \quad (52)$$

Este tipo de altitude é ideal para estudos hidráulicos e hidrológicos. Foi adotado, por exemplo, no sistema vertical específico dos Grandes Lagos (IGLD-85), na América do Norte, com valor de $9,806199 \text{ m/s}^2$ no denominador (CC-GL-BHHD, 1995, p. 8). Zilkoski et al. (1992, p. 146) afirmam que NAVD-88 e IGLD-85 são equivalentes, já que, em cada RRNN comum aos dois sistemas, os respectivos números geopotenciais são iguais.

No caso da América do Sul, o monitoramento do Aquífero Guarani constitui um exemplo de possível aplicação das altitudes dinâmicas, em função das necessidades hidrológicas e de sua grande extensão (Figura 12).



FIGURA 12 – AQUÍFERO GUARANI

FONTE: ABAS, 2006

Torge (2001, p. 251) menciona que a principal desvantagem das altitudes dinâmicas origina-se das diferenças relativamente grandes em relação às altitudes niveladas. Tal argumento baseia-se na comparação da correção ortométrica, equação (49) (p. 47), com a correção dinâmica, fazendo $g^{arbitr} = \gamma_0$:

$$\delta H_{AB}^D = \int_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} dH \quad (53)$$

observando que a composição das parcelas adicionais no segundo termo de (49) compensa, em grande parte, os efeitos da primeira parcela. A confirmação daquele argumento está vinculada ao estudo da adequação dos diferentes tipos de altitude, que constitui um dos objetivos desta Tese.

Para as altitudes normais (H^N), substitui-se (FREITAS, BLITZKOW, 1999, p. 53) o valor médio da gravidade real g_m na equação (46) (p. 47) pelo equivalente da gravidade normal, γ_m :

$$H^N = \frac{C}{\gamma_m} \quad (54)$$

Isso faz com que as altitudes normais não se refiram propriamente ao geóide, mas sim a uma superfície próxima a ele – denominada, por isso, quase-geóide. À separação entre quase-geóide e elipsóide, contada a partir deste ao longo da normal, dá-se o nome anomalia de altitude (ζ):

$$\zeta \approx h - H^N = N - \frac{g_m - \gamma_m}{\gamma_m} H^{ort} = N - \frac{\Delta g_B}{\gamma_m} H^{ort} \quad (55)$$

sendo Δg_B a anomalia Bouguer.

Cabe ressaltar que a interpretação original da anomalia de altitude diz respeito à separação entre o teluróide e a superfície física, no contexto da teoria de Molodensky (e. g., TORGE, 2001, p. 216).

O valor médio da gravidade normal, ao longo da linha vertical, para a latitude φ e a altitude normal H^N , é dado por (HEISKANEN, MORITZ, 1967, p. 170):

$$\gamma_m^v = \gamma_0 \left[1 - \frac{H^N}{a} (1 + \alpha + m - 2 \alpha \sin^2 \varphi) + \left(\frac{H^N}{a} \right)^2 \right] \quad (56)$$

sendo a , m , α e γ_0 , parâmetros vinculados ao SGR.

Assim, a altitude normal é obtida, com precisão melhor que 0,01 mm, após poucas iterações – comumente, de três a cinco.

Para tentar dar um mínimo significado físico às altitudes resultantes exclusivamente das observações de nivelamento geométrico, busca-se compensar o efeito do não paralelismo das superfícies equipotenciais no desnível de cada seção de nivelamento. Este efeito é corrigido pela hoje denominada correção normal ortométrica δH^{Nort} , introduzida, de acordo com Bowie e Avers (1914, p. 52), pelo geodesta alemão Friedrich Robert Helmert (1884):

$$\delta H^{Nort} \approx -2\alpha_1 H_m \Delta\varphi \sin(2\varphi_m) [1 + (\alpha_1 - 2\alpha_2/\alpha_1) \cos(2\varphi_m)] \quad (57)$$

sendo H_m a média das altitudes niveladas dos extremos da seção, $\Delta\varphi$ a correspondente diferença de latitudes, φ_m a média das mesmas, e os parâmetros α_1 e α_2 da fórmula de Helmert para a gravidade normal (p. 31).

Refinamentos posteriores incluem a expressão obtida por Rapp (1961, apud ALLISTER, FEATHERSTONE, 2001):

$$\delta H^{Nort} = (AH_m + BH_m^2 + CH_m^3) \Delta\varphi \quad (58)$$

da qual (57) é um caso particular, desconsiderando B , C e os termos de segunda ordem em A .

Ignorando o último fator em (57), e compatibilizando as unidades de H_m e da correção, com $\Delta\varphi$ em minutos de arco, Gemael (2002, pp. 211 e 213) introduz a já comentada correção “pseudo-ortométrica”:

$$\delta H^{po} = 1542 \times 10^{-9} H_m \Delta\varphi' \sin(2\varphi_m) \quad (59)$$

cujos resultados são equivalentes aos da equação (57).

Para uma seção de nivelamento, em condições brasileiras comuns, o valor dessa correção ultrapassa facilmente 1 mm. Para redes verticais de âmbito continental em que não se associam valores de gravidade, como a brasileira, é imprescindível, ao menos, a aplicação da correção normal-ortométrica.

2.3. SISTEMAS DE ALTITUDES

Como discutido na seção anterior, a definição de um sistema vertical é caracterizada pela escolha tanto da superfície de referência quanto da coordenada, isto é, a grandeza parametrizadora da posição vertical em relação a tal superfície. Nesta seção, são discutidos os conceitos associados à realização de um sistema vertical, i. e., o posicionamento de um conjunto arbitrário de estações geodésicas em relação à superfície de referência. Assim, pode-se afirmar que tais discussões estão vinculadas, respectivamente, a abordagens dedutiva e indutiva do problema do posicionamento vertical: “a dedutiva modela o geopotencial a partir de estudos teóricos, enquanto a indutiva é baseada na análise de dados reais” (TAPLEY, KIM, 2001, p. 371).

2.3.1 – Sistema de referência vertical global e topografia do NMM

Mesmo antes do surgimento do conceito de geóide (seção 2.2.4), o NMM já era adotado como superfície de referência para as altitudes – e. g., Close et al. (1921, p. 8) mencionam que o “Primeiro Nivelamento Geodésico” da Inglaterra, realizado entre as décadas de 1840 e 1860, teve como *datum* a média das preamares e baixamares observadas durante dez dias de 1844 em Liverpool. Posteriormente, foi reconhecida “a possibilidade de uma deformação permanente da superfície do mar em relação ao geóide”, mesmo que fossem considerados apenas dados coletados em costa aberta e durante vários anos (id., p. 31-33).

O aumento do conhecimento acerca da dinâmica dos oceanos levou à revisão da hipótese básica (diferença desprezível entre Geóide e NMM). Com isso, em vez de se considerar os diversos NMM locais definindo uma única superfície equipotencial, passa-se a trabalhar com o conceito de topografia do NMM (TNMM), expressão mais adequada para os termos *sea surface topography* (SSTop) e *dynamic ocean topography* (DOT). Entendida como a separação entre o NMM e o geóide, a TNMM resulta da ação “quase-permanente” de diversos fatores meteorológicos e oceanográficos. Em outras palavras, as médias de longo prazo da pressão atmosférica, do vento, da salinidade, dos efeitos dinâmicos da topografia do fundo do mar nas regiões costeiras e de outros agentes físicos forçam o aparecimento da TNMM. Cada ponto da costa está sujeito à ação diferenciada

desses agentes físicos e, conseqüentemente, é possível a associação de um valor de TNMM para cada estação maregráfica existente. Isso explicaria as grandes diferenças mostradas na Figura 4.

Com isso, tornar-se-ia atraente a idéia da definição de um *datum* altimétrico baseado em múltiplas estações maregráficas. No entanto, a zona costeira introduz significativas dificuldades, notadamente para a integração de dados de marégrafos e de altimetria por satélites (ALTSAT), como discutido na próxima seção.

Além da utilização da ALTSAT, um outro caminho para a determinação da TNMM seria a utilização do método das funções-resposta (e. g. MERRY, VANÍCEK, 1981). Este método permite uma quantificação detalhada de cada contribuição para a TNMM referente às áreas da costa onde se localizam estações maregráficas. O primeiro passo é a análise espectral por mínimos quadrados das séries temporais de nível do mar, de pressão atmosférica etc., para a identificação das componentes significantes em cada uma delas. Determina-se então a função resposta do nível do mar para cada uma dessas componentes espectrais. Definidas estas funções-resposta, realiza-se uma regressão polinomial de baixa ordem, objetivando a obtenção da função-resposta para a frequência zero, i. e., o próprio NMM local.

No entanto, apenas na década de 1970 a “vaga formulação da coincidência aproximada entre geóide e NMM” tornou-se incompatível com as precisões alcançadas nas medições geodésicas (FISCHER, 1977), devido, principalmente, ao surgimento da Altimetria por Satélites (ALTSAT) e ao aprimoramento do posicionamento geocêntrico (RAPP, 1995). Desde então a definição e realização de um Sistema de Referência Vertical Global (SRVG) tem sido discutida no contexto da crescente disponibilidade de dados oriundos das técnicas espaciais.

Rummel e Teunissen (1988), por exemplo, analisam a conexão entre redes de nivelamento separadas por oceanos sob o ponto de vista da solução de um PVCG para a determinação da diferença de geopotencial C_{PQ} entre os respectivos pontos de referência, como esquematizado na Figura 13. Na formulação de tal PVCG, grandezas como as anomalias da gravidade são redefinidas com a inclusão de uma parcela referente à diferença de cada *datum* vertical em relação a um *datum* selecionado.

Heck, Rummel (1990) mencionam várias estratégias para unificação de *data* verticais:

- a) a aplicação de conceitos hidrodinâmicos, resultando nos chamados nivelamento estérico (referente a perfis verticais de salinidade e temperatura em águas profundas) e nivelamento dinâmico ou geostrófico (envolvendo somente correntes horizontais) ;

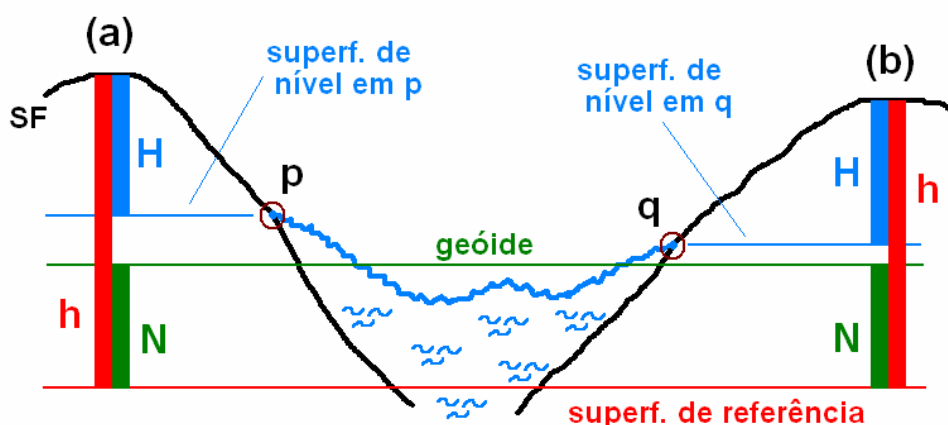


FIGURA 13 – CONEXÃO TRANSOCEÂNICA DE SISTEMAS VERTICAIS

FONTE: Rummel, Teunissen (1988)

- b) a utilização do nivelamento geostrófico para extrapolação das informações de altimetria por satélites até as estações maregráficas definidoras dos *data* verticais ;
- c) a integração de levantamentos convencionais (nivelamento, gravimetria, GNSS) a modelos de alto grau do geopotencial, estimando-se a discrepância entre os *data* verticais mediante colocação por mínimos quadrados ; e
- d) a solução de um PVCG incluindo termos referentes à discrepância entre os *data* verticais, como discutido por Rummel e Teunissen (op. cit.).

A aplicação dos conceitos hidrodinâmicos é discutida intensivamente por Rummel e Ilk (1995), que mencionam a existência de fatores críticos, como a questão da modelagem das forças de fricção. Nesse contexto, a utilização de modelos hidrodinâmicos modernos, em que seu tratamento é mais refinado, pode minimizar sua influência. Existem diversos desses modelos para áreas específicas

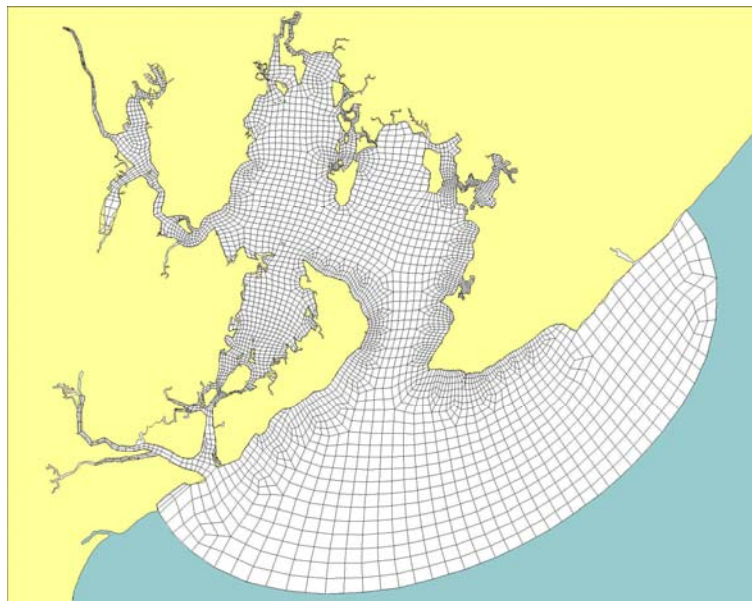


FIGURA 15 – MALHA DO MODELO DA COPPE/UFRJ PARA A REGIÃO DE SALVADOR

FONTE: Rosman (2005)

Outro problema apontado por Rummel e Ilk (1995) diz respeito à inexistência de soluções satisfatórias para os problemas de valor de contorno altimétrico-gravimétrico (PVCAG), àquela época. O surgimento do PVCAG com integração de GPS e RRNN (tipo III, LEHMANN, 2000) e o aprimoramento das técnicas de modelagem computacional, melhoraram aquele quadro. Grebenitcharsky e Sideris (2005), trabalhando com outro tipo de PVCAG, apresentam sugestões “promissoras” para o tratamento dos problemas oriundos da co-existência, no modelo numérico, de diferentes tipos de observações geodésicas (“condições de contorno”). Lehmann (2000) sugere que o advento das missões espaciais gravimétricas introduzirá significativos aprimoramentos no problema da vinculação de *data* verticais. De fato, Arabelos e Tscherning (2001) estimam em 7,3 cm a precisão do vínculo vertical entre Amsterdam e Rio de Janeiro, com resultados simulados da missão GOCE. Assim, a possibilidade de aplicação da estratégia “d” de Heck e Rummel (1990) parece aumentar.

A recente “reinvenção” das câmaras zenitais com tecnologia digital, associadas a GPS (e. g., HIRT et al., 2005; MÜLLER et al., 2005), também contribui para a modelagem do geóide, através da determinação relativa de ondulações geoidais, de modo independente dos métodos gravimétricos. Já foram relatadas precisões de 0,1”, correspondentes a desníveis de 0,5 mm em distâncias de 1 km.

No caso da vinculação entre os *data* de Imbituba e Santana, entretanto, a região da Ilha de Marajó constitui um ambiente longe do ideal para a utilização daquele tipo de equipamento. Além das dificuldades logísticas, a grande distância entre Belém e Santana (330 km) também implicaria em uma possível inviabilização do trabalho.

Por fim, a estratégia “c” de Heck, Rummel (1990) parece ter a mais imediata aplicação. Comparando informações de um modelo do geopotencial e de GPS sobre nivelamento, Featherstone (2002) estimou a discrepância entre os *data* verticais de Austrália e Tasmânia. No entanto, os resultados levaram o autor a enfatizar outro problema: a distorção das redes de nivelamento de Austrália e Tasmânia, devida à utilização de múltiplas estações maregráficas como referência nos respectivos ajustamentos – no caso da Austrália, 30 estações maregráficas foram utilizadas para o estabelecimento do chamado AHD (id.).

No contexto da vinculação dos 13 diferentes *data* verticais da Nova Zelândia a seu novo *datum* tridimensional NZGD2000, Amos et al. (2005) calcularam modelos preliminares do geopotencial. Tal estudo teve como foco alguns aprimoramentos dos dados de gravidade – notadamente o processo de “reconstrução” das anomalias do ar livre, para considerar a correção de terreno de forma mais realística. Como resultado secundário, o estudo possibilitou a determinação de valores preliminares das discrepâncias entre os *data* verticais neo-zelandeses. Posteriormente, Amos e Featherstone (2005) sugeriram um esquema iterativo de modelagem do geopotencial, a fim de eliminar as discrepâncias entre os *data* verticais, de acordo com proposição anterior de Laskowski (1983, p. 45):

$$\delta\Delta g \approx 0,3086 \Delta H \quad (60)$$

sendo $\delta\Delta g$ a diferença de anomalia da gravidade causada pela diferença ΔH entre os valores de ondulação geoidal extraídos do modelo do geopotencial e os decorrentes da aplicação dos resultados de GPS sobre RRNN na equação (47):

$$\Delta H = N - h + H \quad (61)$$

Com novos valores de anomalias, corrigidos daquelas diferenças, calcula-se novo modelo do geopotencial, cujas ondulações do geóide levam a novos valores de ΔH (Figura 16).

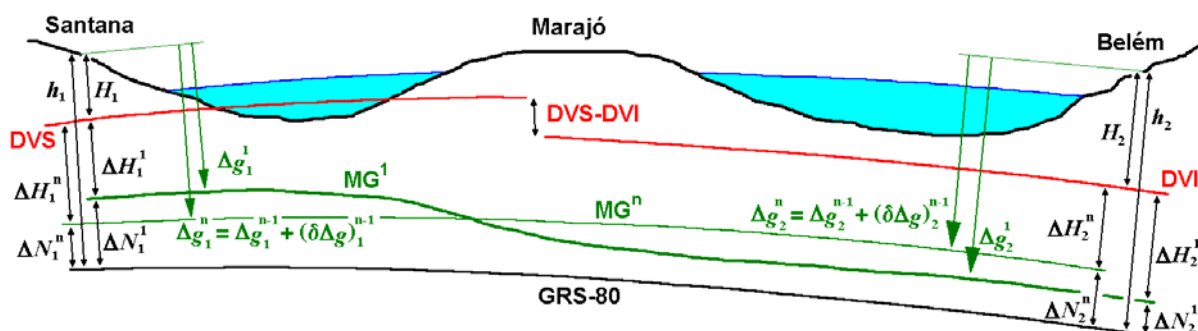


FIGURA 16 – DISCREPÂNCIAS ENTRE DATA VERTICAIS OBTIDAS POR MODELAGEM ITERATIVA DO GEOPOTENCIAL

FONTE: adaptado de Amos, Featherstone (2005)

NOTA: cada versão k (de 1 a n) dos diferentes conjuntos de anomalias da gravidade, referidas ao i -ésimo datum vertical (Δg_i^k), é integrada no processo de cálculo da k -ésima versão do modelo geoidal unificado (MG^k). Deste modelo são extraídas alturas geoidais que levam às correções $\delta\Delta g_i^k$, dando origem a sucessivas novas versões das anomalias e do modelo, até a estabilização do processo

Recentemente surgiram novas propostas de estabelecimento de um SRVG, tanto no âmbito dos estudos referentes ao SVSIRGAS, quanto no contexto do Projeto “Estruturas de Referência Vertical” (IC-P 1.2) da Associação Internacional de Geodésia (IAG). Ihde (2007) apresenta as convenções recomendadas pelo IC-P 1.2 para definição de um SRVG, dentre as quais se incluem, e. g.:

- a) o datum vertical global deve ser definido por um valor de W_0 ;
- b) a posição vertical deve ser dada pelo número geopotencial; e
- c) o sistema deve adotar o conceito “zero” para a maré permanente.

Além disso, aponta inconsistências de 0,9 m e 0,4 m entre os valores de GM e a adotados no GRS-80 e nas Convenções IERS-2003, e informa que o IC-P 1.2 recomendou a continuação de tais estudos sob a forma, mais perene, de um grupo de trabalho (IC-WG). Cabe ressaltar que, durante suas atividades, o próprio IC-P 1.2 não obteve consenso em relação às estimativas de W_0 , como disposto pelo próprio Ihde (id., p. 17).

Tais estimativas, apresentadas por Bursa et al. (2007, p. 105) e Sánchez (2006, p. 644), são baseadas na tradução matemática da coincidência entre geóide

e NMM, i. e., a minimização das diferenças entre os geopotenciais dessas superfícies no âmbito da superfície oceânica global S_{OC} :

$$\int_{S_{OC}} (W - W_0)^2 dS_{OC} = \min \quad (62)$$

Sánchez (id.) obteve seus resultados a partir da discretização dessa equação segundo células de $1^\circ \times 1^\circ$, integrando modelos do geopotencial e dados de ALTSAT cobrindo toda a área livre de gelo dos oceanos. A autora afirma que as estimativas de W_0 assim obtidas são praticamente independentes do modelo do geopotencial, apresentam fraca dependência em relação ao modelo de superfície média, mas têm grande sensibilidade à abrangência dos dados considerados – isto é, a alteração dos limites norte e sul da área considerada tem forte impacto sobre os resultados. Resultados não publicados por Bursa et al. (2006) ratificam esta conclusão, mostrando que as estimativas anuais de W_0 com diferentes abrangências espaciais resultam em variações opostas àquelas obtidas sem alteração dos limites norte e sul (Figura 17).

Bursa et al. (2007) também afirmam que a aplicação de correções referentes à pressão atmosférica (efeito do “barômetro inverso”, discutido na próxima seção) têm grande impacto sobre as estimativas de W_0 .

A Figura 17 apresenta tais variações anuais de W_0 , cujas médias são:

$$\text{Bursa et al.: } W_0 = 62\,636\,856,0 \pm 0,5 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (63)$$

$$\text{Sánchez: } W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (64)$$

É interessante notar que, apesar da discrepância entre os valores de W_0 , Sánchez (id.) e Bursa et al. (2007) fornecem soluções equivalentes para a diferença de geopotencial do *Datum* de Imbituba. A primeira autora menciona um valor equivalente a -0,20 m para o geopotencial em Imbituba, enquanto os outros autores o colocam a +0,03 m. Assim, ambos grupos sugerem implicitamente o valor:

$$W_{IMBITUBA} = 62\,636\,855,55 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (65)$$

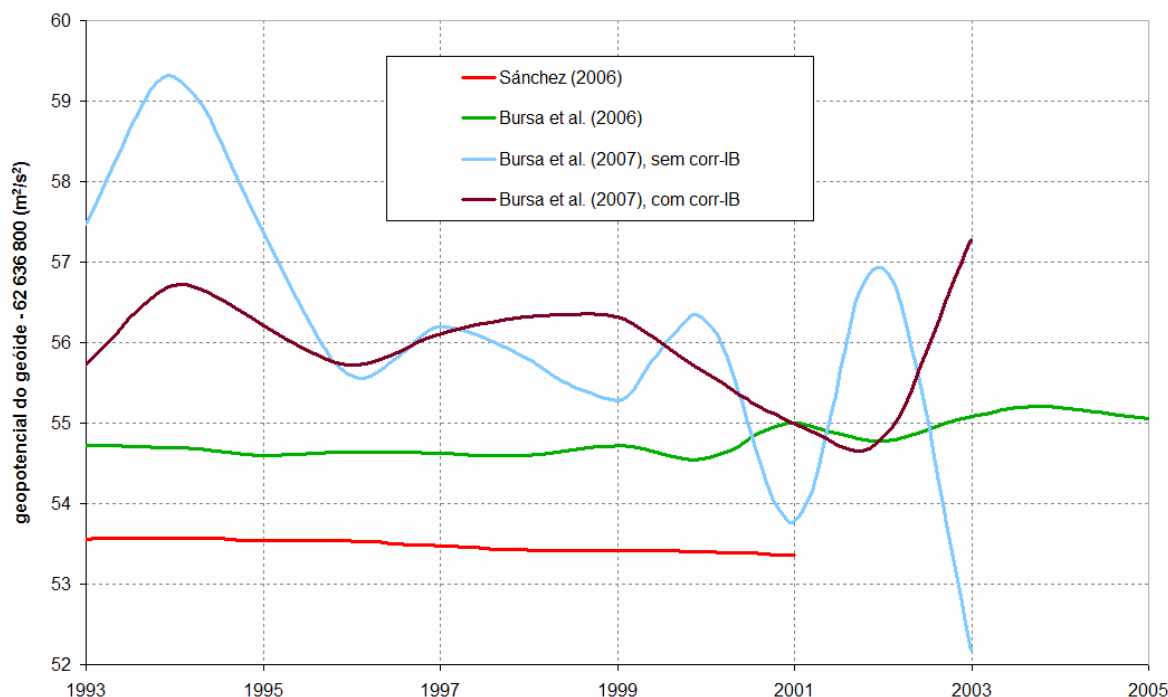


FIGURA 17 – ESTIMATIVAS DA VARIAÇÃO DE W_0

FONTE: Sánchez (2006), Bursa et al. (2006, 2007)

NOTA: adicionar $62\,636\,800\text{ m}^2/\text{s}^2$ às ordenadas

2.3.2 – Observação do nível do mar

2.3.2.1 – Estações maregráficas

Discussões extensas e detalhadas sobre os diversos tipos de marégrafos podem ser encontradas na última edição do manual da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (IOC, 2006), além de Pugh (1987). No presente trabalho são abordados resumidamente os modelos utilizados na Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG).

O modelo convencional (Figura 18) consiste basicamente de um flutuador (bóia) no interior de um tubulão (poço de tranquilização, *stilling well*) ao qual se conecta um cabo que transmite seu movimento vertical às engrenagens do sistema de registro. O poço objetiva proteger bóia e cabo contra quaisquer objetos flutuantes e atenuar os movimentos bruscos da superfície da água causados pelas ondas de pequeno período. Tal atenuação é obtida através da limitação da comunicação entre o interior do tubo e o mar, mediante a utilização de orifícios ou condutos.

Usualmente, o sistema de registro é composto por componentes mecânicos que reduzem e transmitem o movimento da bóia até uma pena. Esta deixa traçado esse movimento em um gráfico de papel suportado por um tambor, cuja rotação imprime ao papel um movimento perpendicular à direção do movimento da pena. Existem modelos com autonomia diária, semanal e até bimestral, dependendo da alimentação de papel (rolo contínuo ou folhas avulsas) e da velocidade angular do tambor.

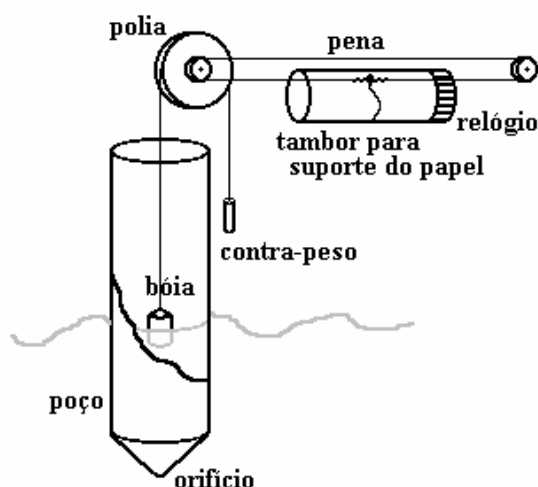


FIGURA 18 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MARÉGRAFO CONVENCIONAL
 FONTE: IOC (2006)

O controle do nível de referência das observações é tradicionalmente realizado por intermédio da régua de marés (Figura 19 e Quadro 2). Nas ocasiões em que o operador da estação maregráfica faz a substituição do gráfico de papel, é feita uma leitura do nível d'água (NA) na régua, permitindo que as alturas do NA entre duas leituras sucessivas sejam interpoladas com base no gráfico respectivo. Assim, todas as observações referem-se ao zero da régua, que por sua vez é referido às RRNN da estação maregráfica através do nivelamento geométrico periódico do topo da régua. Isso permite que os NA sejam posteriormente referenciados a qualquer outro *datum* vertical, além de evitar que eventuais alterações na posição da régua introduzam tendências ou desvios fictícios nos dados de nível do mar. Uma forma mais elaborada de controle da referência das leituras é constituída pelo chamado “teste de Van de Castele” (IOC, 1985, p. 26),

que também permite diagnosticar problemas mecânicos nos marégrafos convencionais e eventuais obstruções do poço. Neste procedimento, são realizadas leituras freqüentes – em geral, a cada 15 minutos – e simultâneas da régua e dos marégrafos, ao longo de um ciclo completo de maré, ou seja, pelo menos 13 horas.

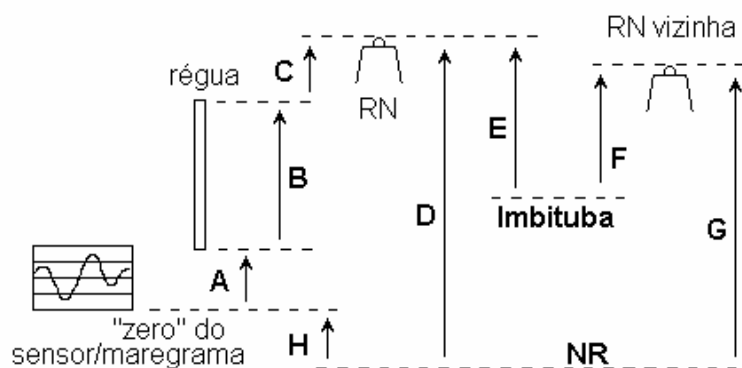


FIGURA 19 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS

FONTE: IBGE, 2004

NOTA: ver Quadro 2 para a identificação das grandezas codificadas

QUADRO 2 – ELEMENTOS DE CONTROLE E TRANSFERÊNCIA DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA DAS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS

- A. (Dados) x (Régua) – valores obtidos através de leituras de aferição (“Van de Castele”)
- B. Leitura nominal do topo da régua
- C. (Régua) x (RN-prim) – valores obtidos através de nivelamento geométrico direto da régua
- _. (RN-prim) x (outras RNs) – verificação da estabilidade da RN (não representado da Figura)
- D. (RN-prim) x (NR) – altura da RN primária acima do Nível de Redução da DHN (“NR”)
- E. Altitude da RN primária referente a Imbituba, obtida no BDG do IBGE
- F. Altitude referente a Imbituba (BDG) da RN primária de um marégrafo vizinho
- G. (RNviz) x (NR) – altura da RN primária da estação vizinha acima do NR
- H. Constante a ser adicionada às leituras do marégrafo para referenciá-las ao NR

FONTE: IBGE, 2004

Durante certo período, algumas estações da RMPG utilizaram também um modelo de marégrafo denominado genericamente régua de eletrodos. Trata-se, essencialmente, de uma régua de marés dotada de eletrodos igualmente espaçados – geralmente de 1 cm – ao longo de toda a faixa de variação do NA. A determinação

da altura do NA em cada instante de observação, cujo intervalo amostral é pré-programado, é feita mediante a verificação do estado de cada eletrodo. Aqueles já submersos fecham os circuitos respectivos. Assim, o sistema de observação é digital em sua origem, conferindo grande simplicidade à estação maregráfica que utilize este tipo de sensor.

A régua com os eletrodos deve ser instalada no interior de um poço de tranquilização, necessário à proteção da régua e à eliminação da agitação do NA. A transferência do *datum* das observações é realizada da mesma forma que na estação maregráfica convencional, ou seja, nivelamento do topo da régua, mas o resultado tem maior precisão, em função da ausência da variação do NA causada pelas ondas de alta frequência.

Atualmente, grande parte das estações da RMPG é equipada com sensor de pressão. A utilização desse tipo de sensor deve ser feita com cuidado, devido à possibilidade de efeitos anômalos decorrentes da conversão da pressão hidrostática em NA. Tais anomalias podem surgir, por exemplo, da incidência de correntes ou ondas nos poços de tranquilização (e. g., LUZ, 1996).

Por fim, cabe mencionar que a estação da RMPG em Salvador opera desde 2005 com um marégrafo do tipo NGWLMS (*Next Generation Water Level Measurement System*).

NGWLMS é o nome genérico pelo qual vem sendo conhecida a configuração inicialmente desenvolvida pela agência governamental norte-americana NOAA, e que está sendo gradualmente adotada como padrão para monitoramento de longo prazo do NMM (LENNON et al., 1992). É constituída por um sensor acústico montado no topo de um tubo cujo objetivo principal é o estabelecimento de uma superfície adequada para a reflexão dos sinais acústicos. Um tubo existente no interior do poço de proteção serve de guia para a propagação dos sinais acústico do sensor até a superfície da água. A calibração da velocidade do som é feita através da reflexão do sinal acústico em uma espécie de anteparo, cuja distância ao sensor é previamente conhecida, e da observação da temperatura do ar no interior do tubo.

Além do sensor primário, acústico, as estações NGWLMS dispõem de um sensor secundário, de pressão. O sistema de registro é totalmente digital, podendo incorporar dados de sensores auxiliares (condutividade, temperatura etc), e

permitindo também a transmissão dos dados de variadas formas (satélite de comunicação, rádio-freqüência, telefonia etc). O controle do *datum* é feito de maneira extremamente precisa, pois o nivelamento é realizado sobre o próprio sensor.

Uma característica comum a todos os sensores de NA utilizados nas estações da RMPG é o fato de suas observações referirem-se a níveis relativos – nos marégrafos convencionais, o zero da régua de marés; nos sensores de pressão, a profundidade em que se encontram; nos NGWLMS, a altura do transdutor acústico acima do NA. Uma análise mais cuidadosa leva à conclusão de que a referência efetiva é a estrutura onde são instalados os equipamentos. A fim de evitar que os movimentos locais ou regionais da crosta contaminem os dados de nível do mar, as estações maregráficas devem ser dotadas de estações de observação GNSS contínua, denominadas usualmente CGPS.

A nova edição do “Manual de Medição e Interpretação do Nível do Mar” (IOC, 2006) afirma ser desejável a existência de múltiplos métodos de detecção de movimentos verticais, conforme Figura 20. Como exemplo, o manual menciona a descoberta, com dados de gravímetros absolutos, de erros sistemáticos nas estimativas de movimentos verticais dadas pelo monitoramento GPS em estações maregráficas inglesas (IOC, 2006, p. 34). A situação da RMPG é apresentada na seção 3.3 (p. 106).

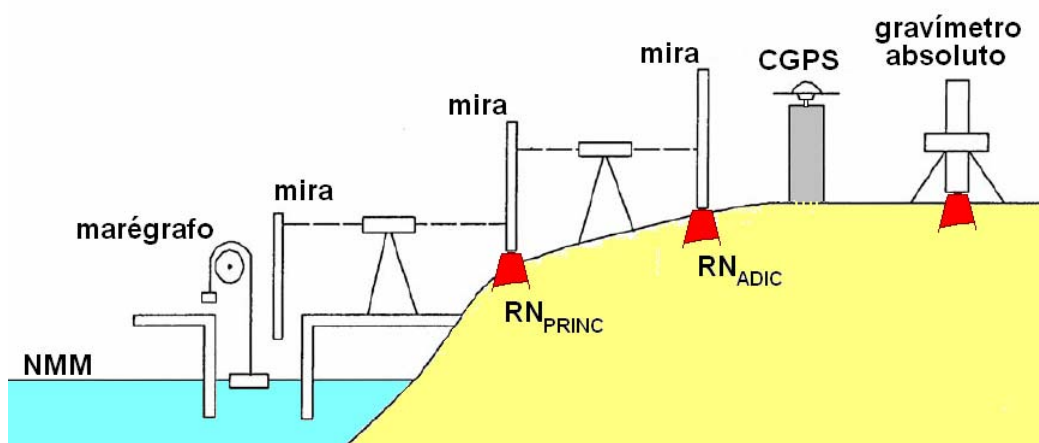


FIGURA 20 – CONTROLE GEODÉSICO DE ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS

FONTE: IOC (2006, p. 31)

2.3.2.2 – Altimetria por Satélites

O princípio de observação da Altimetria por Satélites (ALTSAT) baseia-se na medida do tempo de retorno de um pulso de micro-ondas emitido pelo satélite. O pulso incide na superfície irregular do oceano, e parte da radiação retorna ao satélite. A área de incidência/reflexão (*footprint*) do pulso tem alguns quilômetros de diâmetro (7 km, para as condições oceânicas “normais”), o que introduz a necessidade de modelagem da diferença vertical entre a superfície refletora média e o nível “médio” do mar (sem ondas e outros efeitos locais). Há que se considerar também os efeitos da atmosfera na propagação do pulso, e ainda outros efeitos, representados resumidamente na Figura 21, e sintetizados pela equação:

$$R_{corr} = R_{altim} + \sum r_{instrum} + \sum r_{atmosf} + \sum r_{superf} + \sum r_{geof} \quad (66)$$

sendo R_{corr} a distância do satélite à superfície “média”, R_{altim} a distância nominal, $r_{instrum}$ as correções instrumentais, r_{atmosf} as correções referentes aos efeitos atmosféricos, r_{superf} as correções referentes à superfície refletora, e r_{geof} as correções geofísicas (maré, barômetro inverso).

A distância nominal R_{altim} é dada por $ct_{altim} / 2$, sendo c a velocidade da luz no vácuo e t_{altim} o duplo tempo de percurso. Esta estimativa inicial deve sofrer as correções instrumentais $r_{instrum}$, referentes, dentre outras causas, às alterações de frequência do sinal refletido, à deriva do temporizador, às variações de atitude do satélite e aos ajustes introduzidos pelos próprios sistemas de coleta e tratamento do sinal refletido, embarcados no satélite, a fim de maximizar a resolução vertical das observações (CHELTON et al., 2001, p. 33). Estes últimos assumem particular importância nos momentos de transição de superfície – e. g., quando o satélite passa a receber sinais de retorno de superfície oceânica após ter sobrevoado áreas terrestres –, o que afeta as aplicações específicas da ALTSAT em áreas costeiras, como as pretendidas nesta Tese.

Os efeitos atmosféricos r_{atmosf} são constituídos pelas componentes ionosférica e troposférica. Esta última, por sua vez, é tratada separadamente segundo os efeitos dos gases secos e do vapor d’água. Nas últimas missões, os altímetros operam em duas frequências, fazendo com que os efeitos ionosféricos

sejam facilmente corrigidos. Da mesma forma, os efeitos do vapor d'água são tratados a partir das observações dos radiômetros embarcados. No entanto, isso introduz um problema adicional: a seção do cone de leitura dos radiômetros tem, ao nível do mar, um diâmetro maior que o *footprint* do altímetro – no caso do TOPEX/Poseidon, 48 km e 6 km, respectivamente (RUF et al., 1994). Na prática, isso limita a distância máxima de aproximação das observações altimétricas em relação aos marégrafos costeiros. Além disso, Chelton et al. (2001, p. 47) afirmam que os radiômetros são particularmente vulneráveis a derivas instrumentais.

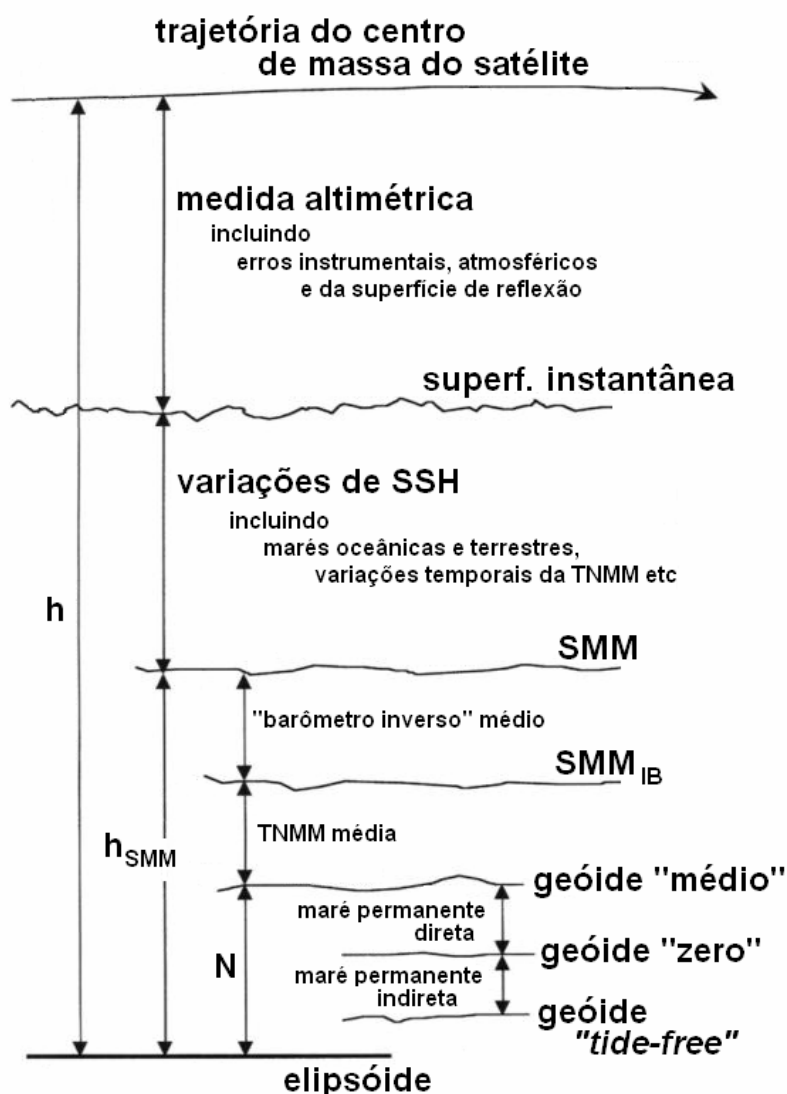


FIGURA 21 – SÍNTESE DOS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA OBSERVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR COM SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

FONTE: adaptado de Tapley, Kim (2001, p. 374)

As correções r_{superf} referentes à superfície refletora dizem respeito à já citada irregularidade da superfície oceânica em função das ondas, que introduz um desvio, em relação ao NMM instantâneo, conhecido comumente por SSB (*sea state bias*). Chelton et al. (2001, p. 57) informam que tal desvio é constituído por duas parcelas, uma das quais (EMB, *electromagnetic bias*) de difícil calibração. Chambers et al. (2003) reportam uma errônea equivalência de calibração entre os dois altímetros utilizados durante a missão TOPEX/Poseidon (T/P), atribuindo a tal problema uma alteração de 1,7 mm/ano para 2,8 mm/ano nas estimativas de elevação global do NMM. Cabe ressaltar que os dados de ALTSAT utilizados nesta Tese utilizam o modelo aprimorado de SSB destes autores.

Dentre as correções geofísicas r_{geof} , incluem-se as marés terrestres e oceânicas, as alturas geoidais, o nível dinâmico do mar, e o efeito do barômetro inverso (variação da pressão atmosférica). No caso das áreas costeiras, a correção das marés oceânicas e dos níveis dinâmicos assume grande importância, em função da amplificação que estes fenômenos experimentam nessas áreas.

De posse da distância corrigida R_{corr} , obtém-se finalmente a altitude h_{SMM} da superfície média do mar (SMM, em contraposição a NMM, conforme Tapley, Kim, 2001, p. 372) em relação ao elipsóide de referência:

$$h_{SMM} = h_{sat} - R_{corr} - r_{cruz} \quad (67)$$

a partir da altitude h_{sat} do satélite em relação ao mesmo elipsóide (Figura 21), derivada das informações oriundas dos diversos sistemas de rastreamento dos satélites altimétricos (e. g., CHELTON et al., 2001, p. 73), e da componente radial residual r_{cruz} , resultante da análise dos cruzamentos (*crossovers*) das trilhas ascendentes e descendentes (e. g., BOSCH, 2006a). Ainda que o pós-processamento padrão de alguns daqueles sistemas de rastreamento também incluía a análise de cruzamentos, uma determinação adicional de r_{cruz} é necessária quando se integram informações de múltiplas missões altimétricas, como no caso dos estudos relatados no Capítulo 5, em que se utilizaram dados fornecidos por Bosch e Savcenko (2006).

Cabe ressaltar que h_{SMM} é denominada SSH (*sea surface height*) na bibliografia corrente.

Uma informação de ALTSAT comumente utilizada é a chamada anomalia do nível do mar SLA:

$$SLA = h_{sat} - R_{corr} - r_{cruz} - h_{SMM}^{mod} \quad (68)$$

obtida a partir de modelos da SMM.

2.3.3 – Redes verticais

2.3.3.1 – Nivelamento geodésico

O nivelamento geodésico combina a rotina comum do nivelamento geométrico (Figura 22) à utilização de equipamentos, procedimentos e correções compatíveis com os requisitos de alta precisão. Nessa Figura, observa-se a seção individual entre as RRNN A e B, formada pela seqüência de estações intermediárias do nível (N1 e N2) e das miras (i1), cujo desnível total observado é dado pela diferença entre os somatórios das leituras a ré (R_i) e a vante (V_i). O encadeamento de múltiplas seções segundo percursos fechados (circuitos) dá origem às redes de nivelamento, como aquela exemplifica na Figura 23.

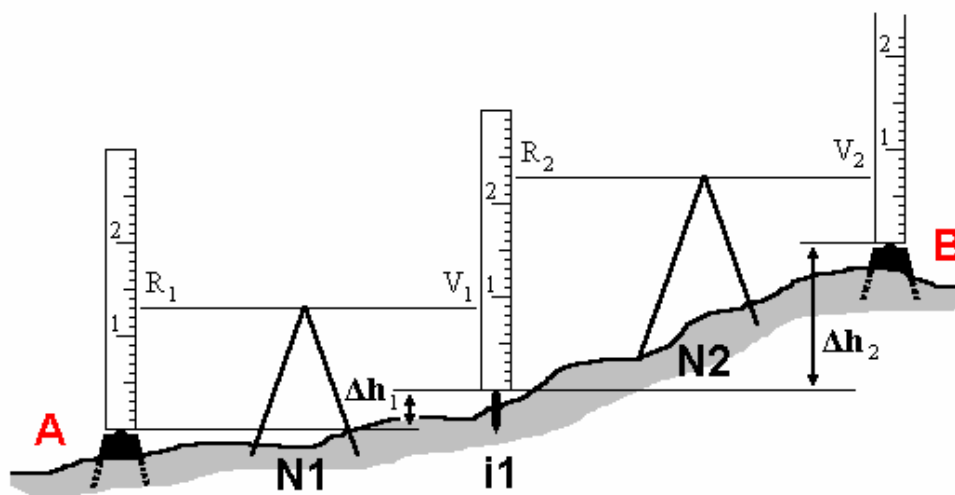


FIGURA 22 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

Para atender àqueles requisitos de alta precisão na Geodésia, o nivelamento geométrico comum é desenvolvido com as seguintes condições (TORGE, 2001, p. 206-210):

- a) níveis: dotados de dispositivos ótico-mecânicos (bolha bi-partida e micrômetro de placa plano-paralela) que permitem alta precisão, respectivamente, na horizontalização da linha de visada (eixo de colimação) e na interpolação das leituras nas miras. Os níveis atuais têm horizontalização automática (por compensadores) e leitura digital (reconhecimento de códigos de barras nas miras);
- b) miras: dotadas de dupla graduação (esquerda/direita) em fita de metal de baixo coeficiente de dilatação (invar), cuja diferença serve de controle de erros grosseiros, e dotadas também de níveis esféricos, a fim de evitar o erro de inclinação das miras; e
- c) correções:
- i. realização de pelo menos uma repetição da seção, em sentido oposto (“contra-nivelamento”), com diferentes operador e anotador, e sob diferentes condições meteorológicas;
 - ii. leituras da temperatura do ar a diferentes alturas, e também da pressão atmosférica, para correção dos efeitos da refração vertical;
 - iii. posicionamento das miras R e V a distâncias iguais, a fim de eliminar os erros de curvatura terrestre e de colimação (diferença entre a bolha principal e o eixo ótico da luneta);
 - iv. erro de índice eliminado mediante a utilização da mesma mira para início e fim de cada seção (número par de estações do nível);
 - v. anotação da data e hora de leitura e do azimute da linha de visada, para correção da maré terrestre;
 - vi. observação gravimétrica em cada RN, e até mesmo nas estações intermediárias, para correção dos efeitos de não paralelismo das superfícies equipotenciais e de distribuição heterogênea de densidades; e
 - vii. leitura das graduações das miras na ordem $R_{esq}V_{esq}V_{dir}R_{dir}$, (RVVR, em notação resumida, ou BFFB, de *backward/forward*, na literatura em língua inglesa), a fim de minimizar os efeitos do recalque diferencial entre nível e miras.

No contexto desta Tese, cabe destacar a correção dos efeitos da refração vertical e da maré terrestre. No caso da RAAP, a aplicação prática de ambas é impossível, em função da necessidade de conversão do grande volume de registros originais (cadernetas de campo) para meio digital. Esta impossibilidade tem

importantes conseqüências, comentadas a seguir. Quanto às especificidades da RAAP, elas são discutidas no próximo Capítulo.

Na rede de nivelamento exemplificada na Figura 23, os $l=3$ circuitos são formados por $m=12$ linhas internodais (p.ex., RN0-RN8), cada qual formada por n seções individuais com desníveis ΔH_i e comprimentos K_i . Assim, cada j -ésima linha tem comprimento $S_j=K_1+\dots+K_n$ e desnível $dH_j=\Delta H_1+\dots+\Delta H_n$.

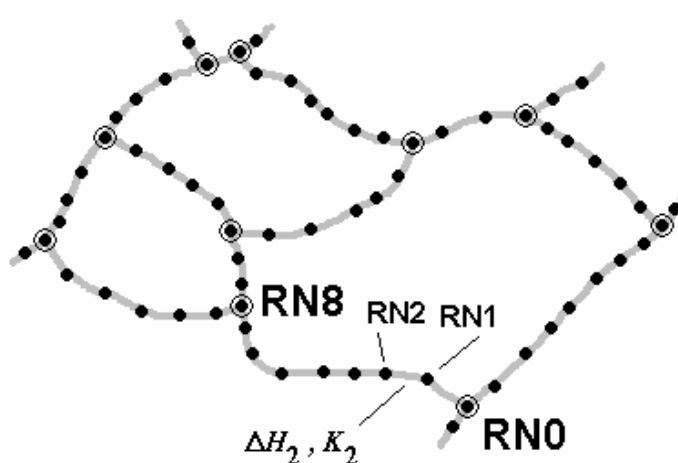


FIGURA 23 – ELEMENTOS DE UMA REDE DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO
FONTE: adaptado de Vaníček, Krakiwsky (1986, p. 432)

Denotando por $\sigma_{\Delta H_i}^2$ a variância do i -ésimo desnível da j -ésima linha, a variância $\sigma_{dH_j}^2$ do desnível total dessa linha é expressa por (VANÍČEK, KRAKIWSKY, 1986, p. 433):

$$\sigma_{dH_j}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_{\Delta H_i}^2 \quad (69)$$

desde que se possa considerar estatisticamente independentes os desníveis ΔH_i . Sob tal condição, e assumindo ainda que todos os ΔH_i são determinados com a mesma precisão – expressa pelo desvio-padrão σ_1 do desnível ao longo da distância unitária –, a expressão anterior assume a forma:

$$\sigma_{dH_j}^2 = \sigma_1^2 \sqrt{S_j} \quad (70)$$

Considerando o k -ésimo circuito, de perímetro $P_k = S_1 + \dots + S_p$ e formado por p linhas com variâncias dadas pela última expressão, a variância do “erro de fechamento” $\varepsilon_k = dH_1 + \dots + dH_p$ do circuito é dada por:

$$\sigma_{\varepsilon_k}^2 = \sigma_1^2 P_k \quad (71)$$

que permite obter os erros de fechamento padronizados:

$$\tilde{\varepsilon}_k = \frac{\varepsilon_k}{\sigma_1 \sqrt{P_k}} \quad (72)$$

Vaníček, Krakiwsky (id., ibid.) argumentam que as redes de nivelamento de muitos países mostram erros de fechamento padronizados com desvios padrão muito acima da unidade. Os autores mencionam que a causa mais provável de tal inconsistência seria a errônea hipótese de independência estatística dos desníveis individuais. Uma das origens da dependência evidenciada seria a presença de erros sistemáticos não modelados.

No caso da RAAP, tal possibilidade aplica-se a vários fenômenos. Por exemplo, a chamada “correção gravimétrica” (GEMAEL, 2002, p. 291) – ou “astronômica” (HECK, 1993, p. 19) –, que considera os efeitos periódicos verticais das principais componentes das marés terrestres, não é aplicada. O mesmo pode-se dizer dos efeitos residuais da refração atmosférica, não modelados pelos procedimentos especiais de observação visando alta precisão (visadas iguais a ré e a vante, leituras acima de 50 cm etc) sem observação da temperatura. A própria correção normal-ortométrica introduz uma componente sistemática nos erros de fechamento dos circuitos, já que os efeitos da distribuição anômala de densidades são ignorados.

Como mencionado, a aplicação das correções astronômica e da refração é inviável para as observações da RAAP, já que apenas uma pequena parcela das cadernetas de campo está disponível em meio digital. Assim, seria importante buscar uma análise qualitativa de seus possíveis efeitos acumulados, verificando a hipótese de existência de distorções acentuadas mediante simulações. Um exemplo desse tipo de análises e simulações diz respeito a uma dificuldade orçamentária das atividades de nivelamento no IBGE: nos últimos anos, as medições quase nunca se

iniciaram antes de abril ou ultrapassaram o início de dezembro. Tal padrão seria capaz de introduzir algum efeito sistemático?

2.3.3.2 – Gravimetria

Os valores de gravidade observados nas linhas de nivelamento são usualmente obtidos por intermédio de levantamentos de densificação gravimétrica, conduzidos sob a forma de determinações relativas, referenciando-se, direta ou indiretamente, a estações gravimétricas (EEGG) absolutas. Da mesma forma como no caso do nivelamento geodésico, a abordagem dos detalhes dos levantamentos gravimétricos (e. g., TORGE, 2001, p. 178, 330; CASTRO JÚNIOR, 2005) foge aos objetivos desta Tese, sendo necessário, contudo, destacar alguns aspectos relacionados ao posicionamento vertical.

Heck (1990, 1993) analisa o efeito dos erros sistemáticos na determinação dos valores de gravidade e das anomalias gravimétricas. Em ambos os casos, não apenas o *datum* gravimétrico, mas também os *data* horizontal e vertical, o tipo de altitudes e o fator gravimétrico constituem possíveis fontes de discrepâncias. No caso do Brasil, existem incertezas, em maior ou menor grau, quanto a cada um desses parâmetros nas bases de dados disponíveis (e. g., FREITAS et al., 2002b).

No cálculo da correção de maré, por exemplo, aos diversos conceitos de tratamento da maré permanente associam-se valores específicos do já mencionado fator gravimétrico. Gemael (2002, p. 290) menciona o valor médio de 1,20, recomendando, no entanto, a utilização de estimativas regionais – como no caso de Curitiba, de 1,17. Tais valores referem-se somente à componente semi-diurna, conforme discussões anteriores sobre a maré permanente.

Os levantamentos gravimétricos são essenciais tanto na realização do sistema de altitudes físicas – através da inclusão de valores observados de gravidade no cálculo das altitudes científicas –, quanto na geração dos modelos geopotenciais utilizados na conversão das altitudes geométricas em físicas. Neste caso, os valores de gravidade observada servem para o cálculo das anomalias da gravidade, que são as diferenças entre aqueles valores observados reduzidos ao geóide e os valores da gravidade normal (e. g., TORGE, 2001, p. 262). Expressam, portanto, as heterogeneidades da Terra real em relação ao modelo normal. Das

diversas formas de se obter a citada redução, surgem diferentes tipos de anomalia gravimétrica; por exemplo:

- a) ar livre: considera apenas o gradiente vertical da gravidade, para reduzir ao geóide os valores observados na superfície física;
- b) Bouguer: adiciona à anomalia ar livre os efeitos das massas topográficas entre a superfície física e o geóide, em um horizonte de pouco mais de 160 km em torno do ponto observado. Pode assumir duas formas:
 - i. padrão: as massas topográficas são tratadas como pertencendo a uma camada plana (platô de Bouguer) cuja espessura é a altitude ortométrica do ponto considerado; ou
 - ii. completa: o efeito do platô de Bouguer é corrigido, transformando-o na calota esférica correspondente e, em seguida, aplica-se a correção de terreno, relativa à variação da topografia em torno da estação ; e
- c) isostática: relaciona as massas topográficas acima do geóide às correspondentes "massas compensadoras" nas camadas litosféricas inferiores, minimizando os efeitos da falta de conhecimento preciso da topografia e, por isso, representando melhor os efeitos referentes às vizinhanças do ponto observado.

Existem ainda outras formas de reduzir as observações gravimétricas, cuja abordagem não cabe nesta Tese. É importante destacar as dificuldades de cálculo da correção de terreno no cálculo tradicional de modelos do geopotencial. Os novos modelos globais de elevação, tais como o GTOPO30 – e suas densificações regionais, como a que se iniciou para a América do Sul (BLITZKOW et al., 2002) – e o modelo da missão topográfica do ônibus espacial (SRTM) introduziram um novo componente nesse contexto. Espera-se que isso venha aprimorar consideravelmente os modelos que estão surgindo – o próprio EGM96 carece de consideráveis aprimoramentos em algumas regiões continentais, como no caso da América do Sul.

Um segundo ponto a ressaltar diz respeito à expectativa gerada pelos modelos geopotenciais derivados das missões espaciais dedicadas ao campo da gravidade (CHAMP, GRACE e GOCE). Por exemplo, os produtos da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) já atingiram a significativa precisão de

1 cm para os comprimentos de onda maiores que 360 km (GFZ, 2003), mas já existem notícias de que a mesma resolução é obtida atualmente para 200 km (REIGBER et al., 2004). Tais resultados mostram que, em vez de substituírem os levantamentos gravimétricos terrestres, as missões espaciais aumentarão sua importância, pois os modelos derivados dessas missões não serão capazes de resolver os pequenos comprimentos de onda, exatamente onde é maior a contribuição individual da gravimetria tradicional. A discussão específica das citadas missões foge ao contexto desta Tese, podendo ser encontrada, por exemplo, em Lobianco (2005, p. 118).

2.3.3.3 – Integração Gravimetria-Nivelamento

Krakiwsky, Mueller (1965, p. 18), citando outros autores, analisaram em detalhe as aproximações implícitas na integração numérica presente na equação (43) (p. 45). Em primeiro lugar, a aplicação da equação (5) (p. 20) levaria à necessidade de que as observações de gravidade fossem feitas ou reduzidas à altura média entre o terreno e a leitura da mira, tanto na ré como na vante, conforme Figura 22. Segundo os mesmos autores, para terrenos planos, o erro oriundo da utilização de observações de gravidade no nível dos próprios pontos de estacionamento das miras – em vez daquela altura média – é praticamente nulo. Para terrenos montanhosos, eles classificam como igualmente desprezível o caso extremo do erro total de 1,1 mm para uma linha de nivelamento com desnível total de 4.800 m (id., p. 23).

Ramsayer (1954 e 1959, apud HECK, comunicação pessoal) recomenda os seguintes espaçamentos dos pontos de gravidade: 15-25 km em terrenos planos, 5-10 km em áreas de relevo moderado, e até 1 km em grandes cadeias montanhosas. Assim, a princípio, a determinação de gravidade em cada RN é suficiente para atender àquela condição, para o tipo de relevo brasileiro. No caso em que isso não seja possível (geralmente, por destruição do marco antes de sua ocupação pela gravimetria), deve-se proceder a uma adequada interpolação da gravidade.

2.3.3.4 – Ajustamento paramétrico

O método paramétrico tradicional baseia-se na formulação das observações (ajustadas) L_{aj} como função dos parâmetros estimados (ajustados) X_{aj} (GEMAEL, 1994, p. 117). No caso das redes verticais, os parâmetros são as altitudes ou os números geopotenciais dos extremos da seção ou linha de nivelamento:

$$\Delta H_{AB_{aj}} = H_{B_{aj}} - H_{A_{aj}} \quad \therefore \quad L_{aj} = F(X_{aj}) \quad (73)$$

Linearizando com a fórmula de Taylor, e introduzindo os resíduos V para tornar o sistema consistente após a utilização das observações brutas L_{obs} :

$$L_{obs} + V = F(X_0 + X) = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_{aj}} \right|_{X_0} X = L_0 + AX \quad (74)$$

da qual se obtém o modelo matemático linearizado do método paramétrico:

$$V = AX + L \quad (75)$$

Submetendo esta equação ao critério de mínimos quadrados ($V^T PV = \min$), obtêm-se as chamadas equações normais:

$$A^T P A X + A^T P L = 0 \quad (76)$$

nas quais P é a matriz dos pesos, responsável pela homogeneização das observações com base na sua MVC ($C_{\ell\ell}$) e na variância *a priori* da observação de peso unitário (σ_0^2):

$$P = \sigma_0^2 C_{\ell\ell}^{-1} \quad (77)$$

A ponderação usual no ajustamento de observações de nivelamento geométrico as considera não-correlacionadas e com qualidade dependente da distância nivelada $dist$, expressa em quilômetros:

$$\begin{cases} [C_{\ell\ell}]_{ij} = 0 & i \neq j \\ [C_{\ell\ell}]_{ii} = dist_i \end{cases} \quad (78)$$

A solução do sistema de equações normais (76) é dada por:

$$X = -\tilde{N}^{-1} \tilde{U} \quad (79)$$

cuja MVC é:

$$C_{X_a X_a} = C_{XX} = \sigma_0^2 \tilde{N}^{-1} \quad (80)$$

sendo

$$\tilde{N} = A^T P A \quad (81)$$

$$\tilde{U} = A^T P L \quad (82)$$

Finalmente, o valor *a posteriori* do fator de escala σ_0^2 é dado por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u} \quad (83)$$

sendo n o número de observações e u o número de parâmetros. Gemael (1994, p. 122) afirma que não há razão para se repetir o ajustamento caso haja diferença entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$. No caso do ajustamento de redes de nivelamento (e. g., Tabela 9, p. 120), essa diferença é reflexo do critério de ponderação inversamente proporcional ao comprimento das linhas, resultando em pesos geralmente menores que a unidade (de duas a três ordens de magnitude).

Questões relacionadas à ponderação das observações de nivelamento não são discutidas nesta Tese.

Para finalizar esta apresentação sumária do ajustamento paramétrico, resta um aspecto relacionado às estimativas de qualidade dos parâmetros ajustados, equação (80). A formulação tradicional do ajustamento paramétrico implica na “fixação”, ou injuncionamento, de alguns valores de referência – a altitude do ponto *datum*, no caso das redes de nivelamento –, a fim de tornar \tilde{N} não singular. Este procedimento leva a MVC dos parâmetros a assumir valores que refletem não a consistência interna da rede mas sim a propagação de erros de suas observações a partir dos “pontos fixos” – como se pode observar nos exemplos da Figura 30 (p. 90) e da Figura 48 (p. 121).

Gemael (1994, p. 124) afirma que a condição de \tilde{N} não singular é evitada mediante a utilização de sua inversa generalizada. No caso dos ajustamentos

descritos nesta Tese, onde se buscava avaliar a consistência interna das redes consideradas (seção 4.1, p. 119), foi utilizado um procedimento mais simples, baseado na modificação C_{XX}^L da MVC dos parâmetros (e. g., SCHMITT, 2007):

$$C_{XX}^L = S C_{XX} S^T \quad (84)$$

$$S = I - G^T (GG^T)^{-1} G \quad (85)$$

sendo G o vetor unitário $(1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1)$ e I a matriz identidade, cujas dimensões são adequadamente estendidas de forma a incluir a informação referente ao ponto fixo.

3. FONTES DE DADOS

3.1. REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO DO SGB

O estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), sob coordenação inicial do então Conselho Nacional de Geografia (CNG), teve início em 1945, no extremo sul do Brasil (ALENCAR, 1990). Nos primeiros anos foram realizadas conexões com as redes de nivelamento implantadas pelos então Serviço Geográfico do Exército (SGE, 1950) e Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo (IGG, 1962). Do Sul, a RAAP progrediu inicialmente em direção ao norte do país, através das regiões litorâneas de maior desenvolvimento econômico e demográfico, chegando também à recém estabelecida capital, Brasília (Figura 24). A partir da década de 1970 a implantação da RAAP foi direcionada ao interior do país, à substituição das redes de outras instituições e à reconstituição dos trechos destruídos.

Como se observa no painel direito da Figura 24, as linhas novas constituem um conjunto espacialmente heterogêneo, sequer podendo ser considerada uma rede integral – em poucas regiões essas linhas formam, de fato, redes com geometria adequada. Com isso, na seleção de linhas da RAAP para formação de sub-redes voltadas a estudos específicos, como os do Capítulo 4, a heterogeneidade temporal é um resultado quase inevitável.

A Figura 25 apresenta um exemplo conjunto de heterogeneidade espacial e temporal, decorrente da interrupção do estabelecimento de novas linhas no centro-nordeste do estado de São Paulo (SP), em substituição à rede do IGG. Enquanto uma rede razoavelmente densa de circuitos cobriu a porção central de SP na década de 1990 (representada em vermelho), o oeste continua sendo, até hoje, um “vazio vertical”. Além disso, a definição original do *Datum* de Imbituba (ALENCAR, 1990) implica, necessariamente, na vinculação entre linhas das décadas de 1940 e 1950, como discutido posteriormente.

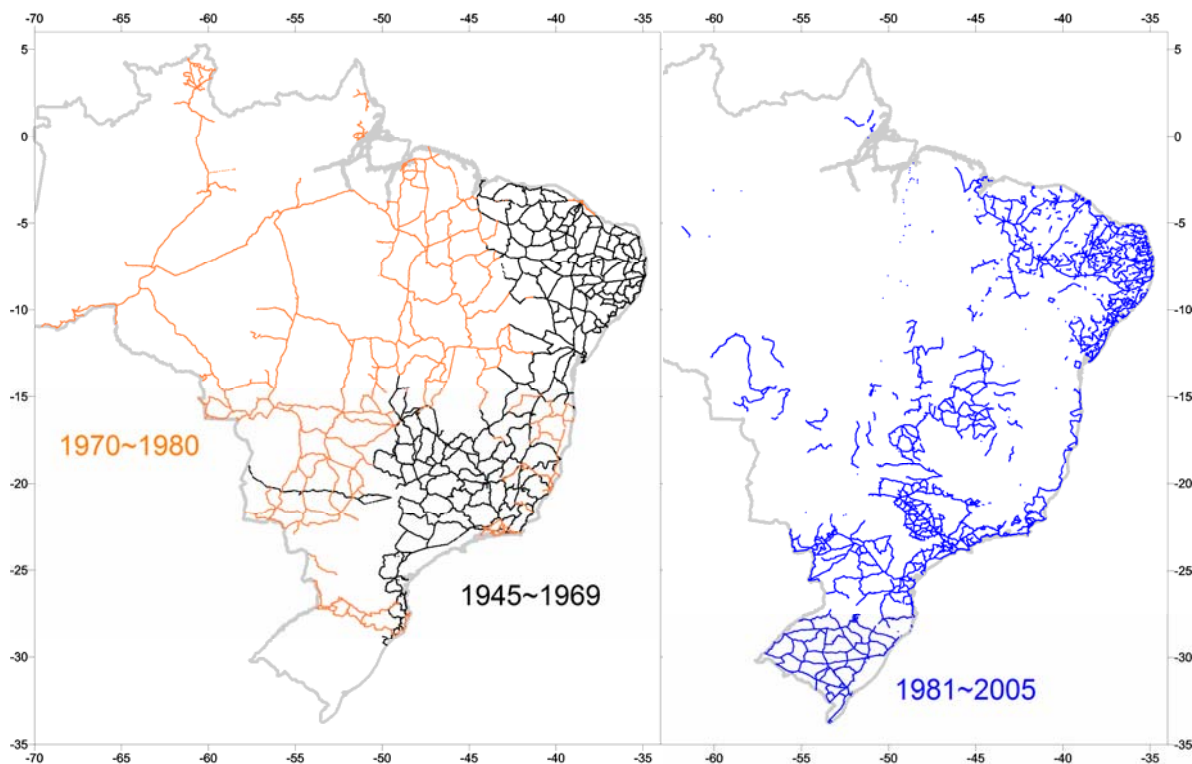


FIGURA 24 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RAAP

NOTA: (esquerda) RRNN estabelecidas de 1945 a 1969, em preto – progredindo do litoral sul em direção norte por uma faixa litorânea de poucas centenas de quilômetros – e de 1970 a 1980, em laranja, quando se iniciou a interiorização do nivelamento ; (direita) RRNN estabelecidas de 1981 a 2005, em azul, para reconstituição da rede e atendimento às áreas não cobertas anteriormente

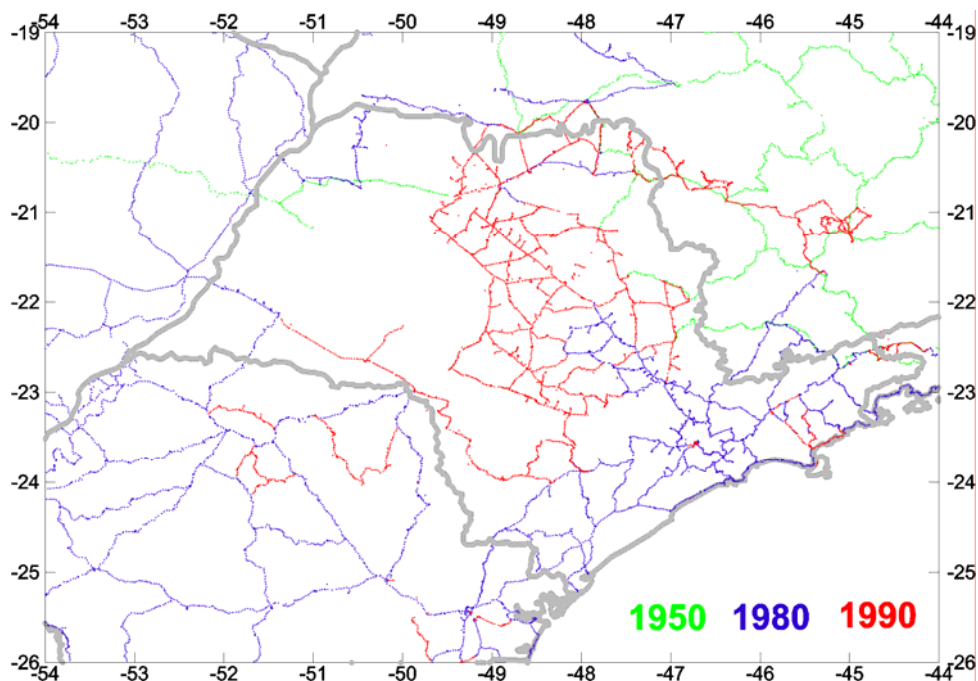


FIGURA 25 – EXEMPLO DE HETEROGENEIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA RAAP

NOTA: RRNN estabelecidas nas décadas de 1950 (verde), 1980 (azul) e 1990 (vermelho). Observe-se o bloco denso e homogêneo no centro de SP, denominado ASUP-SP, e o grande vazio a oeste

3.1.1 – Materialização

Dois tipos de materialização vêm sendo utilizados nas estações da RAAP: chapas cravadas em estruturas pré-existentes, e marcos de concreto construídos especificamente para utilização geodésica. O primeiro tipo é constituído por chapas metálicas, circulares e convexas (Figura 26), estabelecidas em estruturas estáveis, como afloramentos rochosos, sapatas de sustentação de grandes estruturas de engenharia etc. Ao longo do tempo o modelo de chapa sofreu alterações de dimensões, material e letreiros (BESERRA, 1948; IBGE, 1988). Luz, Guimarães (2001) afirmam que alguns desses modelos mostraram-se mais suscetíveis à destruição e/ou deformação, sem, contudo, apresentar dados objetivos.

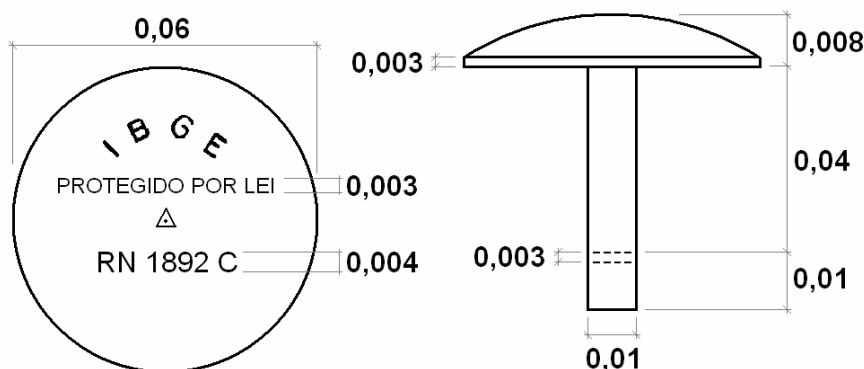


FIGURA 26 – MODELO ATUAL DE CHAPA PARA MATERIALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES GEODÉSICAS DO IBGE

FONTE: IBGE (1988)

O segundo modelo é constituído por marcos de concreto (Figura 27), encimados pelo mesmo tipo de chapa metálica descrita anteriormente. Esse modelo é utilizado tradicionalmente nas margens das rodovias em que não existem estruturas para sustentação adequada das chapas. Luz, Guimarães (2001) mencionam que estes marcos não são compatíveis com a instalação em áreas de aterro, como as margens de rodovias.

Os mesmos autores conjecturam que a utilização de marcos estáveis tornaria menos vulneráveis as posições verticais da RAAP. Estes marcos caracterizam-se pela ancoragem do ponto de referência (chapa ou pino) ao substrato rochoso, por intermédio de varas metálicas de vários metros de

profundidade (NGS, 1978). Os mesmos autores afirmam que a não realização de reobservações sistemáticas das linhas de nivelamento da RAAP impede uma análise adequada dos chamados abalos, evidenciados quando da realização de repetições de pequenos trechos para referência de novas linhas de nivelamento. A escassez de repetições também impede a detecção de eventuais movimentos verticais com origem tectônica.

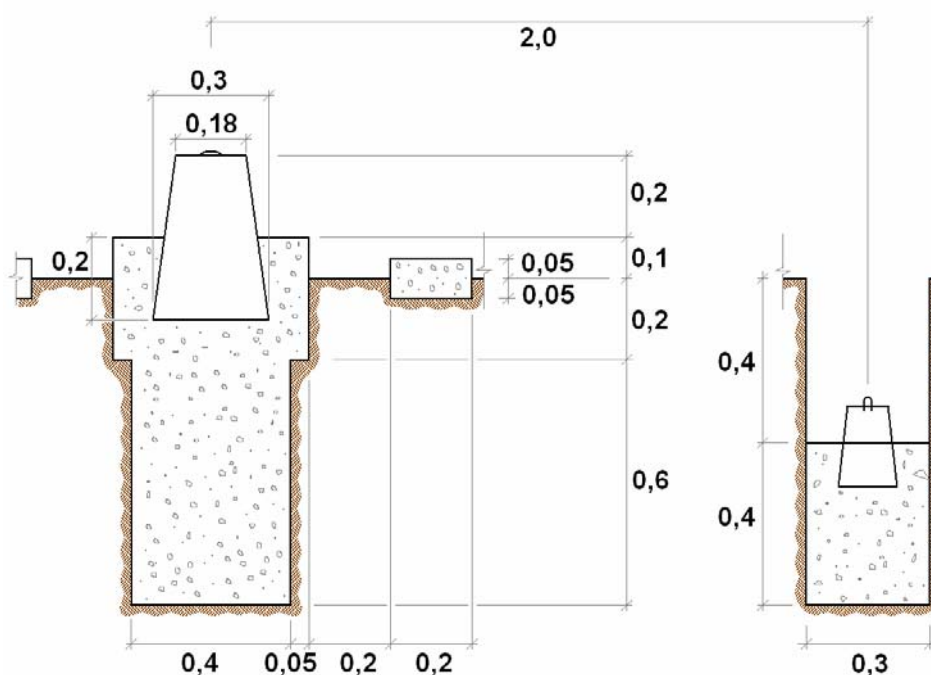


FIGURA 27 – MODELO ATUAL DE REFERÊNCIA DE NÍVEL DO IBGE

FONTE: IBGE (1988)

NOTA: em meados da década de 1990, o IBGE deixou de implantar a chamada “RN de segurança”, constituída por um pequeno marco subterrâneo com pino

Inúmeros marcos de outras instituições foram incorporados às linhas da RAAP nos nivelamentos realizados pelo IBGE. Tal prática permite a interconexão dessas diferentes redes, mas também introduz alguns problemas. Um deles diz respeito à multiplicidade de pontos de referência de alguns modelos utilizados por outras instituições. O exemplo extremo é constituído pelos marcos do IGG (IGG, 1962), cujo pino principal é posicionado 0,6 m abaixo do solo, enquanto que um pino auxiliar é colocado em um marco secundário que aflora aproximadamente 0,3 m. Foram relatados erros excedendo 0,5 m, causados pelo nivelamento de marcos do IGG no pino auxiliar, por desconhecimento daquela peculiaridade (IBGE, 1990).

Erros do mesmo tipo, porém mais perigosos – menos detectáveis, em vista de seu menor valor absoluto –, foram associados a pinos dotados de tampa de proteção, como os utilizados em estações maregráficas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha, e os dispositivos de centragem forçada (DCF) do CPGCG/UFPR, adotados em várias estações GNSS nos estados de PR e SC. Um destes DCF foi utilizado no marco de controle geocêntrico da estação maregráfica de Imbituba – os cuidados associados a tal fato são descritos na seção 3.3.

Um dos erros descritos na seção 4.1 teve origem no fato de que as primeiras linhas de nivelamento, observadas até 1947 e materializadas com as séries 1 a 6, foram niveladas, na verdade, sobre RRNN auxiliares (IBGE, 2007) – piquetes (P) e seguranças (S). As respectivas RRNN principais foram niveladas como “estações excêntricas”, situação exemplificada na Figura 28.

Conforme menção anterior, as estações da RAAP são tradicionalmente denominadas RRNN. Sua identificação é feita por código composto de uma parte numérica de quatro dígitos (série) e por uma letra, não somente para os marcos e chapas estabelecidos pelo próprio IBGE, mas também para as RRNN de outras instituições. Este procedimento é discutido na seção 3.1.5.

3.1.2 – Datum

Até 1959, as altitudes da RAAP referiram-se provisoriamente ao *Datum* de Torres, no Rio Grande do Sul (RS), materializado pela altitude da RN 3L em relação ao NMM obtido de observações maregráficas no período de fevereiro de 1919 a fevereiro de 1920 (ALENCAR, 1968). Em 1959 foi concluído o terceiro ajustamento da RAAP (seção 3.1.4), quando então suas altitudes passaram a referir-se ao *Datum* Vertical Brasileiro em Imbituba (DVB-I), em Santa Catarina (SC). Os detalhes da materialização deste último são mostrados na Figura 28. Nesta figura observa-se que as primeiras RRNN da RAAP, das séries 1 e 2, foram estabelecidas em outubro de 1945. Ao longo dos meses posteriores novas linhas e circuitos foram sendo estabelecidos em direção ao norte do mesmo estado, além do ramal com a série 3, dirigido à rede do então SGE no Rio Grande do Sul. Apenas em dezembro de 1946 foi feita a conexão com a RN SGE-IV, no marégrafo de Torres (IBGE, 2007).

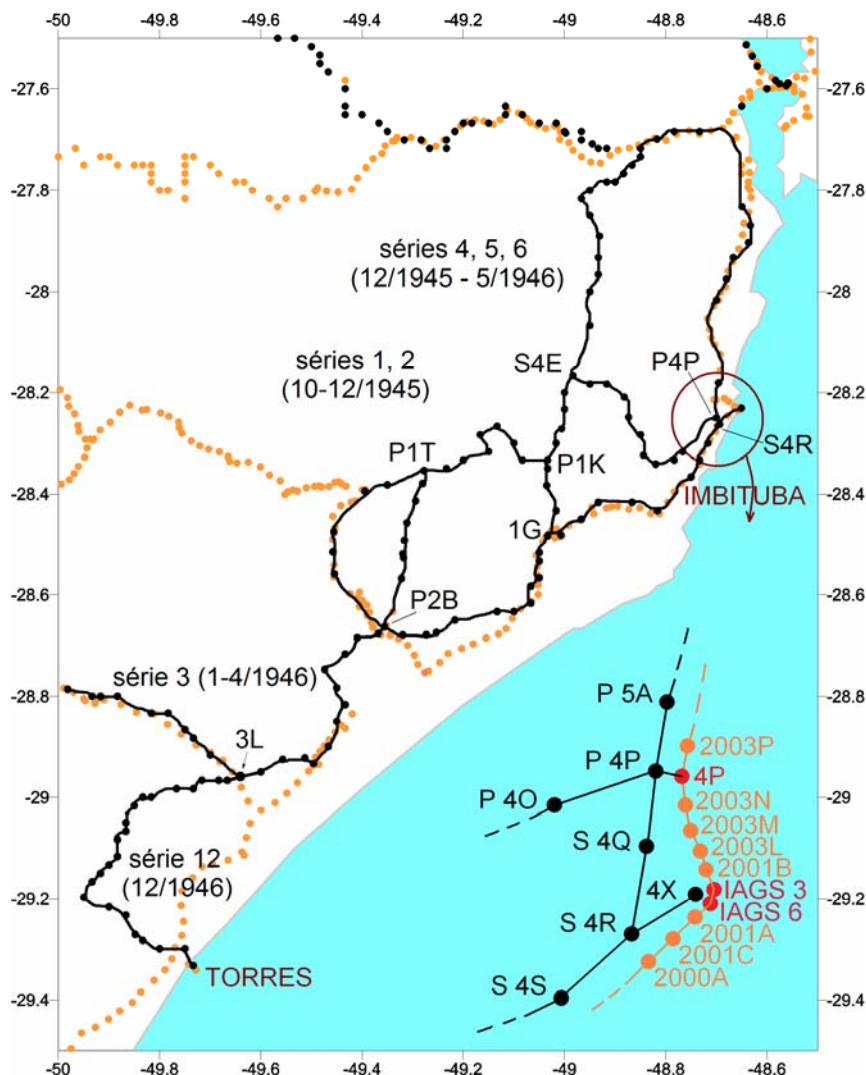


FIGURA 28 – PORÇÃO DA RAAP NA REGIÃO DOS DATA VERTICAIS DE TORRES E IMBITUBA
 FONTE: Luz et al. (2007b)

NOTA: Em preto, linhas da RAAP estabelecidas entre 1945 e 1949. As RRNN em vermelho (4P, IAGS-3 e IAGS-6), também estabelecidas neste período, ainda existiam em 1980 e foram incluídas nas linhas estabelecidas a partir deste ano, mostradas em laranja

A primeira RN da RAAP em Imbituba, 4X, foi estabelecida em junho de 1946, como uma RN comum, já que não se antecipava, àquela época, que o marégrafo ali instalado *a posteriori* definiria o futuro *datum* vertical da RAAP. Depois disso, o nivelamento do IBGE voltou a Imbituba somente em março de 1980. No entanto, outra organização geodésica também realizou nivelamentos sistemáticos em Imbituba. Em 1948, o serviço geodésico internacional (*Inter American Geodetic Survey*, IAGS) da então agência militar de mapeamento dos EUA (DMA, depois NIMA, hoje NGA) iniciou um extenso programa de colaboração com diversas instituições brasileiras, dentre as quais o Conselho Nacional de Geografia (CNG,

hoje Fundação IBGE). O IAGS também apoiou o então Departamento Nacional de Portos, Rios e Canais (DNPRC, depois Portobrás, hoje extinta) com a implantação de nove estações maregráficas na costa brasileira. Além da instalação dos marégrafos, o IAGS estabeleceu uma rede local de nivelamento em cada estação, para controle e referência das observações de nível do mar.

O IBGE utilizou as informações coletadas na estação de Imbituba para definir o DVB-I, sem, contudo, participar diretamente da operação da estação. Em 1959, foi então definido e adotado o *Datum* de Imbituba, através da média dos NMMs anuais, entre 1949 e 1957, referida à RN 4X.

O período de operação das estações do IAGS não foi homogêneo, variando de poucos meses (Salinópolis, no Maranhão, MA) até aproximadamente duas décadas (Fortaleza, Salvador e Imbituba). Em 1971 o IAGS encerrou suas atividades maregráficas no Brasil, assumidas pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias (InPH, sucessor da Divisão de Hidrografia do DNPRC).

Apesar de existirem, as observações adicionais (1958-1971) não foram utilizadas para refinar o *Datum* Vertical. Uma discussão mais detalhada dos nivelamentos de controle do DVB-I é feita na seção 3.3.

O banco de dados do *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL, 1996) possui as médias mensais e anuais para Imbituba e alguns outros portos operados pelo IAGS naquela época. Na Figura 29, observa-se que a diferença entre o NMM₄₉₋₅₇ e o resultante da promediação para todo o período de observação seria menor que 1 cm.

O PSMSL não tem dados do período após a operação das estações ter sido assumida pelas autoridades portuárias brasileiras. No entanto, documentos da antiga Portobrás permitem afirmar que as observações existem. Posteriormente o IBGE obteve, da Companhia Docas de Imbituba (CDI), cópia dos dados originais (maregramas) coletados entre 1986 e 1992. O tratamento desses dados também é discutido na seção 3.3.

A porção da RAAP no estado do Amapá refere-se a um *datum* local, pois não é possível cruzar o Rio Amazonas com nivelamento geométrico nesse trecho. O *Datum* Vertical Brasileiro em Santana (DVB-S) foi definido por observações de nível

do mar no porto de mesmo nome, em período ainda não identificado. O estudo da viabilidade de conexão vertical entre DVB-I e DVB-S é um dos objetivos desta Tese.

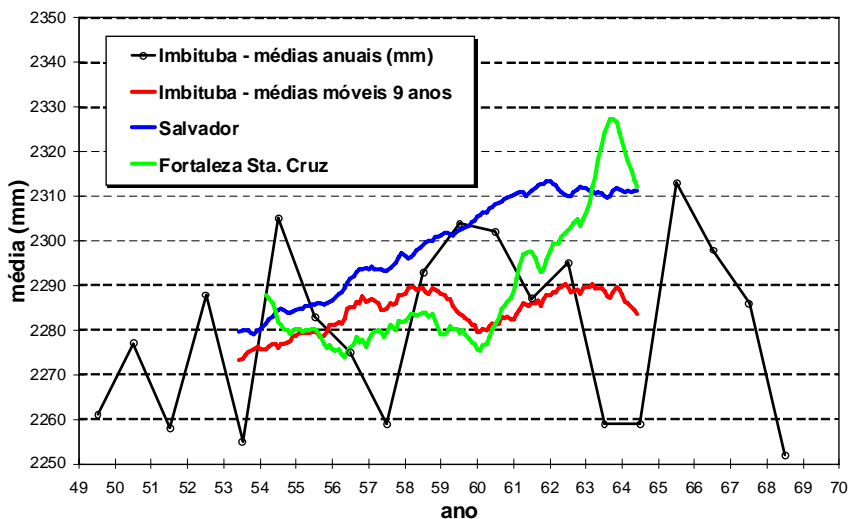


FIGURA 29 – DADOS DE ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DO IAGS NO BRASIL ARMAZENADOS NO PSMSL

FONTE: Luz et al. (2002c)

NOTA: As linhas coloridas representam médias móveis, com amplitude de 9 anos, das médias mensais. Fortaleza de Santa Cruz é o local onde se achava instalada a estação do IAGS “Rio de Janeiro”, próximo à entrada da Baía da Guanabara

3.1.3 – Observações

As medições de nivelamento geométrico foram realizadas, em sua grande maioria, com níveis Wild N3, tripés rígidos e miras invar de dupla graduação, segundo os procedimentos usuais para obtenção de alta precisão (BESERRA, 1948; IBGE, 1983, 1985):

- a. nivelamento e contra-nivelamento (N/CN) usualmente feitos em seqüência, não necessariamente nessa ordem, mas sempre com alternância de operadores. Até 1983, a diferença entre N e CN devia atender à tolerância de $4 \text{ mm} \sqrt{\text{dist}_{km}}$. Em 1983, essa tolerância foi reduzida para $3 \text{ mm} \sqrt{\text{dist}_{km}}$, referente aos levantamentos “de alta precisão” (IBGE, 1983). Cabe ressaltar que, apesar da possibilidade de hierarquização em classes ou ordens (e. g., “de precisão, para

- áreas mais desenvolvidas”, $6 \text{ mm } \sqrt{\text{dist}_{km}}$), não há registro de qualquer tentativa de aplicação das mesmas à RAAP;
- b. novas linhas são vinculadas às existentes somente em RRNN cuja estabilidade relativa seja confirmada mediante a chamada verificação de abalo, i. e., renivelamento de pelo menos duas seções antigas. A tolerância para as diferenças é a mesma utilizada para a diferença N/CN de uma seção.
 - c. miras lidas usualmente na seqüência natural do trabalho (esquerda e direita de ré, esquerda e direita de vante, RRVV, ou BBFF, de *backward* e *forward*), com a alternância da mira utilizada à ré e à vante para eliminação do erro de índice. Existem relatos de que algumas poucas seções foram observadas com BFFB, mas aparentemente tal procedimento não foi incorporado como rotina, apesar de Alencar (1968) afirmar o contrário. Assim, não há garantia de ausência do efeito sistemático do “afundamento” das sapatas das miras no solo;
 - d. observação realizada usualmente nas primeiras horas do dia, até o momento em que os efeitos do aumento da temperatura começam a prejudicar a horizontalização do nível de bolha e a leitura das miras. Eventualmente os trabalhos foram também realizados nos finais de tarde;
 - e. erro de colimação determinado diariamente, no início dos trabalhos, com limite máximo de 0,03 mm/m;
 - f. leitura mínima de 30 cm, a fim de evitar os efeitos da refração nas camadas de ar próximas ao solo;
 - g. comprimento das visadas de até 120 m (ALENCAR, 1968), sendo utilizado atualmente o limite de 60 m;
 - h. visadas aproximadamente iguais a ré e a vante (R/V), com tolerância de 3 m para a diferença entre os somatórios de seção, a fim de evitar a necessidade de aplicação das correções de colimação, esfericidade e refração;
 - i. controles de qualidade das observações (constante da mira, intervalos de estadia e comprimentos R/V) realizado pelo anotador logo após seu registro manual; e
 - j. não realização de leituras meteorológicas para correção dos efeitos sistemáticos relacionados.

Outro tipo de procedimento é utilizado quando o percurso de nivelamento é interrompido por grandes rios. Nas chamadas “travessias de rios”, as observações são constituídas por leituras não das miras, mas sim da graduação do parafuso de calagem da bolha principal (ALENCAR, 1981).

Luz, Guimarães (2001) mencionam que o cálculo das cadernetas é realizado manualmente, e que a inexistência das observações brutas em meio digital torna impossível a aplicação de correções de aplicação complexa, como a dos certificados de aferição das miras ou a correção astronômica. Mencionam ainda que apenas a correção normal-ortométrica, i. e., a correção do não-parallelismo das equipotenciais, é aplicada antes do ajustamento. Após o cálculo manual, os dados referentes a cada seção nivelada são organizados em meio digital segundo a seqüência da linha de nivelamento, para submissão a programas de crítica específicos. A organização dos dados é apresentada na seção 3.1.5.

Conforme explanação anterior, nunca foram utilizadas observações gravimétricas para correção dos dados de nivelamento da RAAP. A justificativa é a ausência, até a década de 90, desse tipo de observações sobre as RRNN da rede, de forma sistemática. Os extensos levantamentos gravimétricos realizados pelo IBGE na década de 60 concentraram-se na região do *datum* horizontal. Somente a partir de 1991, quando se iniciaram os levantamentos gravimétricos sistemáticos no IBGE, foi possível acompanhar com gravimetria todas as novas linhas de nivelamento. Antes disso, inúmeras instituições realizaram observações gravimétricas, mas nem sempre sobre as RRNN da RAAP (LUZ, GUIMARÃES, 2001). O acesso aos dados também constituía uma questão delicada. Essa situação vem sendo alterada com os esforços da Sub-Comissão da IAG para Gravidade e Geóide na América do Sul (BLITZKOW, 1999). Os procedimentos de integração de gravimetria à RAAP são discutidos no Capítulo 4.

3.1.4 – Realizações

Entre 1948 e 1975 foram executados oito ajustamentos manuais, em blocos justapostos (MATTOS, 1948; BESERRA, 1952; ALENCAR, 1968, 1988). Depois disso, iniciou-se a conversão das informações para meio digital, em preparação ao

Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (AAGP), concluído em 1993 (RIBEIRO, LUZ, 1991). Esses ajustamentos são caracterizados na Tabela 5 e na Figura 30.

Três aspectos devem ser destacados nos primeiros ajustamentos. O primeiro deles refere-se à homogeneidade temporal que caracteriza as redes consideradas em cada um dos sucessivos ajustamentos (1948, 1952, 1959, 1962, 1963, 1966, 1970, e 1975). Tal característica foi consequência natural tanto do desenvolvimento espacialmente homogêneo da RAAP naquelas primeiras décadas, como da própria organização daqueles ajustamentos.

Outra característica importante a ser ressaltada nos ajustamentos históricos é a aplicação da correção normal-ortométrica (CNO). Apesar de não explicitada nos relatórios citados, e contrariamente ao afirmado por Luz et al. (2004), a aplicação da CNO nos ajustamentos históricos pôde ser confirmada por intermédio da comparação entre os desníveis considerados nesses ajustamentos e os do último ajustamento (AAGP). A Tabela 6 mostra essa comparação para alguns desníveis do ajustamento de 1952, indicados na Figura 30. Pode-se observar que, exceto por alguns valores exagerados, tais desníveis são suficientemente próximos dos valores com aplicação da CNO, conforme calculada para o AAGP. As pequenas diferenças podem ter origem na incerteza dos valores de latitude das RRNN determinados àquela época. Quanto às diferenças exageradas, não foi possível investigar suas causas.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DOS AJUSTAMENTOS DA RAAP

| Data | Abrangência | Circuitos | Comprimento (km) | <i>Datum</i> |
|------|----------------------|-----------|------------------|--------------|
| 1948 | Total | 8 | 2890 | Torres |
| 1952 | Total | 38 | 15706 | Torres |
| 1959 | Total | 79 | 30249 | Imbituba |
| 1962 | Parcial | 19 | 4227 | Imbituba |
| 1963 | Parcial | 15 | 2941 | Imbituba |
| 1966 | Parcial | 4 | 1215 | Imbituba |
| 1970 | Parcial | 13 | 4378 | Imbituba |
| 1975 | Parcial | 9 | 3620 | Imbituba |
| 1993 | total (particionado) | 377 | 105285 | Imbituba |

FONTE: LUZ et al., 2002c

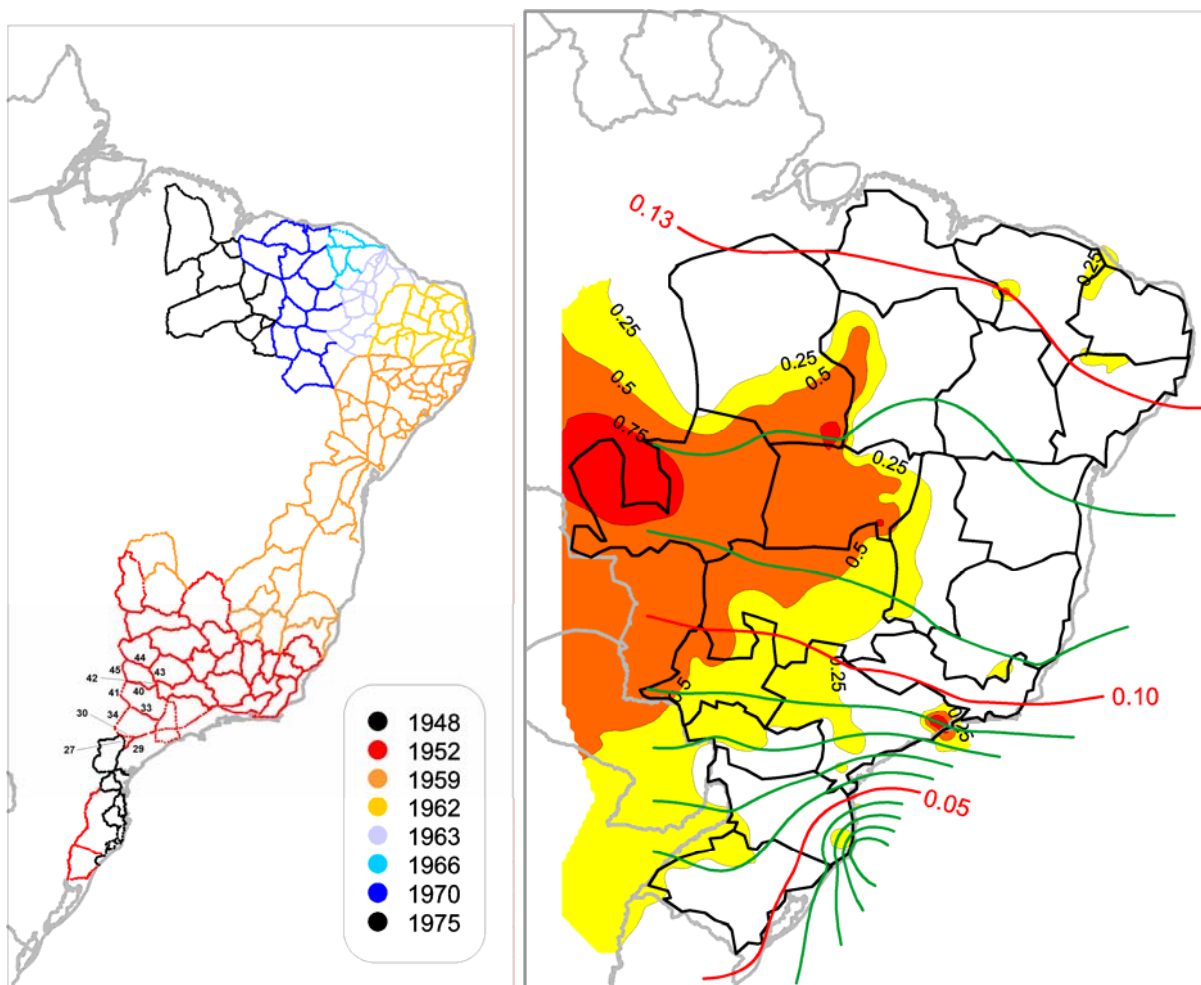


FIGURA 30 – AJUSTAMENTOS DA RAAP

FONTE: adaptado de Luz, Guimarães (2001) e Luz et al. (2002c)

NOTA: (esq.) blocos ajustados entre 1948 e 1975 ; (dir.) (a) em preto, a rede de macrocircuitos do AAGP; (b) em escala de cores (até 0,25 m, sem cor; de 0,25 m a 0,5 m, em amarelo; de 0,5 m a 0,75 m, em laranja; e acima de 0,75 m, em vermelho), são mostradas as diferenças entre as novas altitudes e as altitudes existentes; e (c) em verde e vermelho, observam-se as isolinhas de precisão (m) das altitudes do AAGP

Por fim, deve-se enfatizar que não era constante a diferença entre as altitudes referidas aos *data* de Torres e Imbituba, já que os respectivos ajustamentos consideraram redes significativamente diferentes – o último ajustamento referido a Torres foi realizado em 1952, com aproximadamente metade das observações do ajustamento de 1959. Entretanto, a fim de permitir correlações isoladas, foi determinado um valor médio de 5,84 cm para o nível do *Datum* de Torres acima do *Datum* de Imbituba (ALENCAR, 1968).

TABELA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE DESNÍVEIS DOS AJUSTAMENTOS DE 1952 E 1993

| Linha 1952 (1993) | Comprimento (km) | Desnível 1952 (m) | Desnível 1993 observado (m) | Dif. (mm) | CNO 1993 (mm) | Dif. (mm) |
|-------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|-----------|---------------|-----------|
| 27 (M12.55) | 88,97 | 243,1308 | 243,1609 | -30,1 | -32,9 | 2,8 |
| 29 (M12.56+54) | 97,77 | 220,1132 | 220,1406 | -27,4 | -28,2 | 0,8 |
| 30 (M12.8) | 71,40 | -23,0415 | -23,0422 | 0,7 | 2,4 | -1,7 |
| 33 (M12.6) | 192,64 | 91,6736 | 91,5933 | 80,3 | 21,9 | 58,4 |
| 34 (M12.7) | 187,75 | -3,5715 | -3,5137 | -57,8 | -57,7 | -0,1 |
| 40 (M12.3) | 179,97 | -56,6636 | -56,6675 | 3,9 | 3,7 | 0,2 |
| 41 (M12.2) | 166,83 | 197,9122 | 197,9471 | -34,9 | -34,5 | -0,4 |
| 42 (M12.4) | 17,69 | 200,2670 | 200,2610 | 6,0 | 4,5 | 1,5 |
| 43 (L14.2) | 83,94 | 209,1825 | 209,2052 | -22,7 | -23,6 | 0,9 |
| 44 (L14.1+L13.6) | 149,01 | -34,4465 | -34,4556 | 9,1 | 15,1 | -6,0 |
| 45 (M12.1) | 142,94 | -13,2047 | -13,1733 | -31,4 | -31,9 | 0,5 |

FONTE: LUZ et al. (2007b)

Em função da capacidade limitada do programa de ajustamento paramétrico utilizado no AAGP, aqui denominado AJNIV, não foi possível realizar um ajustamento simultâneo da RAAP (RIBEIRO, 1989). Isso deu origem ao particionamento da rede em “macrocircuitos” (MCs), os quais foram ajustados isoladamente, para fornecer altitudes de partida para o ajustamento das sub-redes internas de cada MC. A rede principal do AAGP, com 38 pontos nodais formando 56 linhas internodais, é mostrada na Figura 32, e seus resultados, na Figura 30, onde se observa as diferenças de quase 1 metro entre as altitudes ajustadas no AAGP e as altitudes anteriormente existentes no Banco de Dados Geodésicos (BDG). Tais diferenças exageradas devem-se, provavelmente, ao fato de que os desníveis das linhas de nivelamento observadas entre 1975 e 1993, isto é, depois do último ajustamento “histórico” e antes do AAGP, não foram ajustados e tampouco receberam a CNO.

Daquelas 56 linhas internodais da rede principal do AAGP, 52 foram separadas em linhas menores, também internodais, para o cálculo de outras 315 RRNN nodais, nos ajustamentos de segundo nível. Estas, por sua vez, foram utilizadas como pontos fixos no terceiro nível de ajustamentos, juntamente com as 37 determinadas anteriormente e com a 4X (Figura 31). Este terceiro nível foi constituído tanto dos ajustamentos das seções das linhas principais quanto dos

ajustamentos das linhas internodais internas (389 RRNN nodais). Com estas, as seções das linhas internas finalmente puderam ser ajustadas.

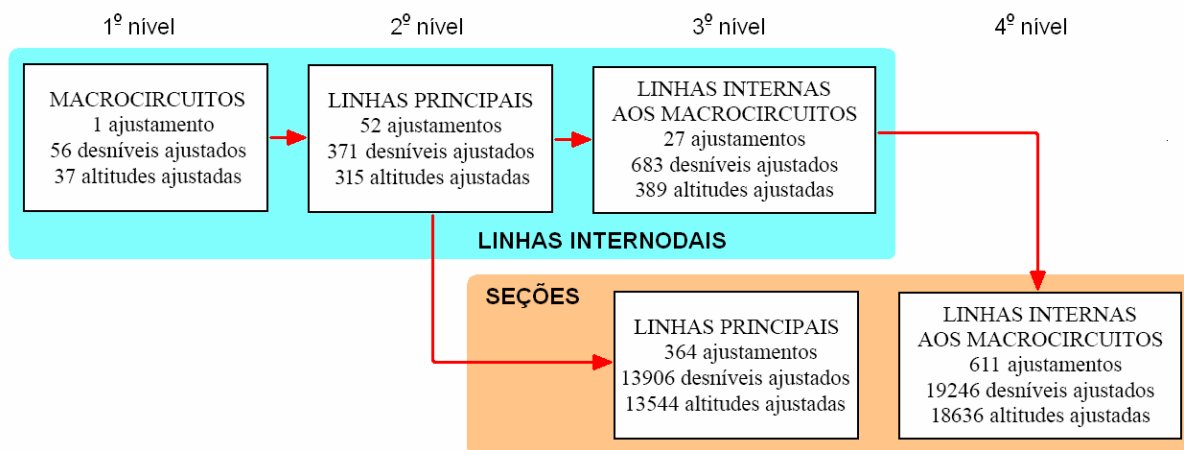


FIGURA 31 – SEQÜÊNCIA HIERÁRQUICA DOS AJUSTAMENTOS DA RAAP

FONTE: adaptado de Ribeiro, Luz (1991), com correção de alguns quantitativos

Devido à deficiência inerente aos procedimentos manuais adotados em sua preparação (RIBEIRO, LUZ, 1991), um número indeterminado de linhas de nivelamento superpostas não foi considerado no AAGP, como o bloco denominado ASUP-SP (Figura 25). Tais linhas foram ajustadas à parte depois de 1993. Assim, o particionamento da RAAP teve uma complexidade maior que a pretendida originalmente.

Além disso, a estratégia de montagem da rede considerada no AAGP privilegiou as linhas mais antigas, com o objetivo de utilizar a mesma materialização do DVB-I dos ajustamentos anteriores – ainda não se dispunha, àquela época, das informações referentes aos nivelamentos do IAGS (seção 3.3). Com a necessidade de incluir, no AAGP, o grande número de linhas observadas após o último ajustamento “histórico” (1975), acentuou-se a heterogeneidade temporal em algumas porções da rede. Isto é especialmente crítico na região de Imituba, como se observa na Figura 28, onde as linhas das décadas de 1940 e 1980 foram integradas para permitir a montagem da rede na Região Sul do país (Figura 24).

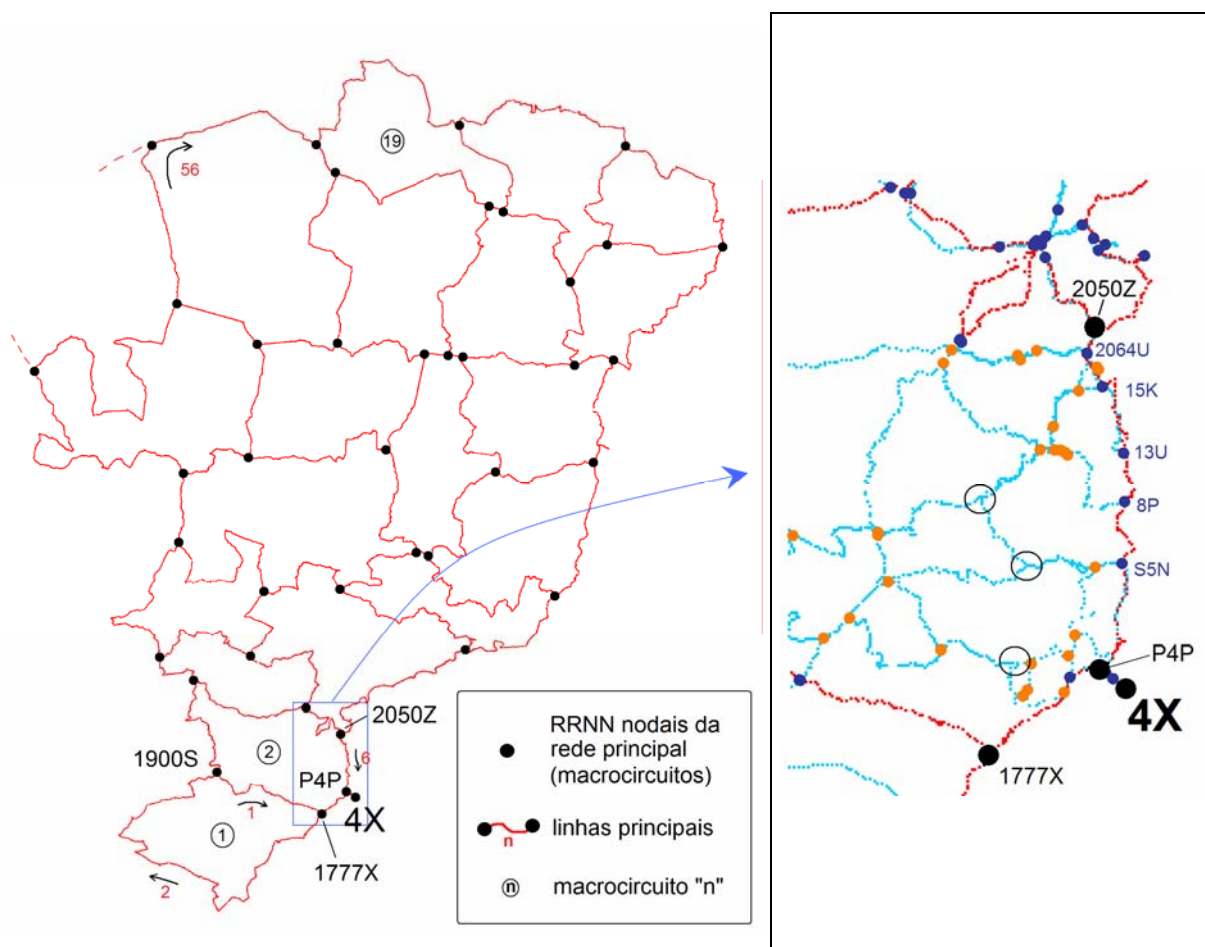


FIGURA 32 – GEOMETRIA DO AAGP

FONTE: adaptado de Ribeiro, Luz (1991)

NOTA: (esq) rede de macro-circuitos formados pelas linhas principais; (dir) exemplo, no litoral de Imbituba a Paranaguá, da hierarquização entre RRNN nodais da rede principal, das linhas principais e das linhas internas (círculos em preto, azul escuro e laranja). Os círculos maiores, vazados, indicam “falsos nodais”, isto é, cruzamentos de linhas de diferentes épocas que não se conectam

A heterogeneidade temporal tem efeitos de difícil quantificação. A detecção de possíveis alterações de posição das RRNN da RAAP é prejudicada pelo pequeno número de seções reniveladas, em consequência da alta taxa de destruição das estações mais antigas. No entanto, a heterogeneidade temporal da RAAP também causou um outro problema – este, de imediata quantificação – na região do DVB-I. A RN 4P, incluída na linha estabelecida em 1980 (Figura 28), foi originalmente determinada em 1946 via RN auxiliar P4P, conforme menção anterior (seção 3.1.1). O vínculo entre estas duas RRNN não foi considerado na mencionada integração dos nivelamentos das décadas de 1940 e 1980. Tal omissão introduziu um erro de 11,91 cm na conexão das linhas novas no Sul do País ao DVB-I. Os efeitos de tal omissão são discutidos no Capítulo 4.

3.1.5 – Organização dos dados

Após o cálculo das cadernetas de campo, os dados referentes a cada seção de nivelamento (trecho medido entre duas RRNN consecutivas) são organizados em arquivos ASCII (texto puro) segundo o formato denominado DECAN, apresentado no Quadro 3. A especificação mostrada não contempla alguns itens de menor importância, como os registros especiais com os somatórios das leituras a ré e a vante, a complementação da data e do índice etc.

O Quadro 4 exemplifica a utilização do formato DECAN, mostrando as linhas de nivelamento que formam o circuito mostrado na Figura 33, ou seja, as linhas D36 e D37 e parte da linha D35, cujas observações foram feitas entre novembro de 1990 e abril de 1991.

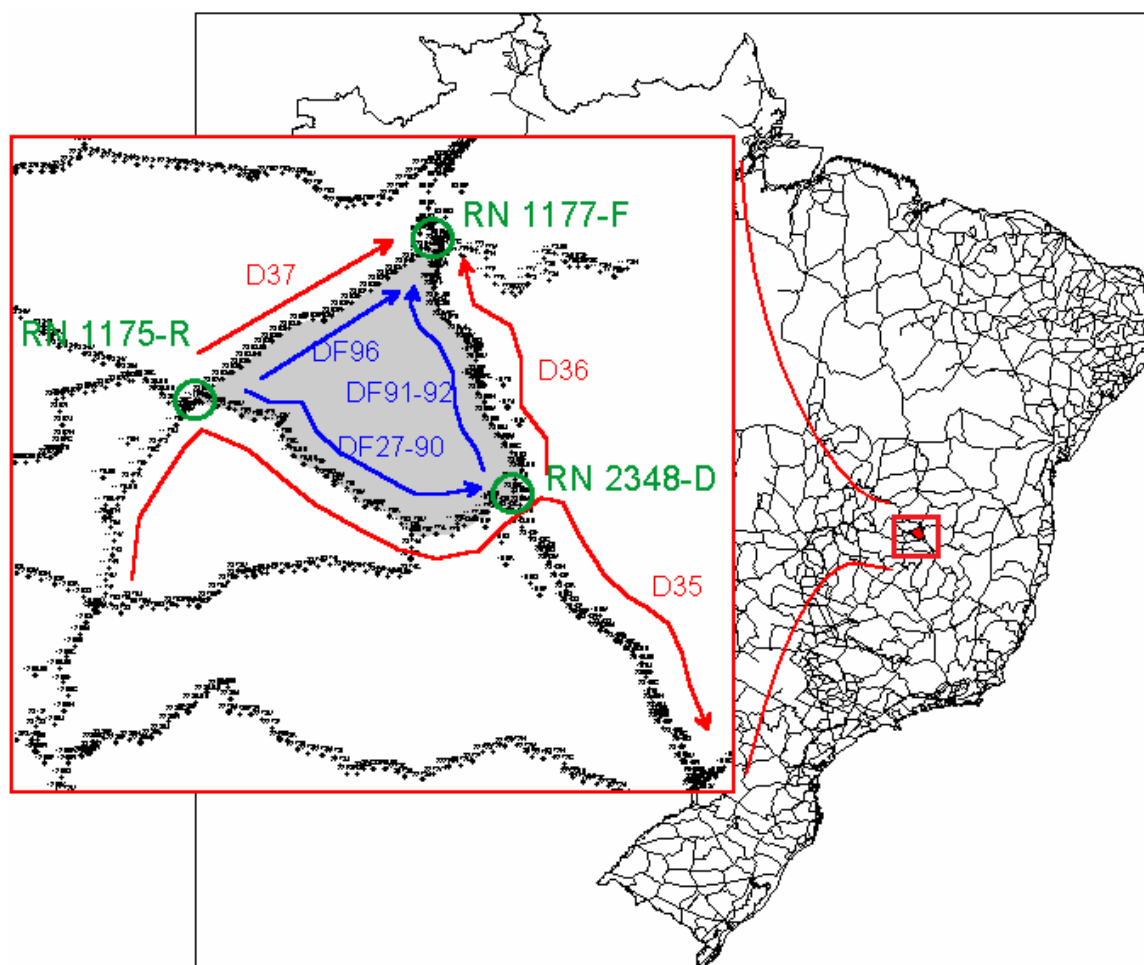


FIGURA 33 – EXEMPLO DE FORMAÇÃO DE CIRCUITO COM AS LINHAS DA RAAP
 FONTE: IBGE (2007)

QUADRO 3 – ESPECIFICAÇÃO PARCIAL DO FORMATO DECAN PARA NIVELAMENTO

| | |
|-------------------|---|
| registro inicial: | - cols. 01-02: códigos de organização dos dados |
| | - cols. 15-60: nome da linha |
| | - cols. 61-70: código da linha |
| registro i: | - cols. 09-12: data de medição (mm/aa) |
| | - cols. 13-17: índice (caderneta e página, ccc/pp) |
| | - cols. 21-28: desnível (décimos de mm) |
| | - cols. 29-33: distância nivelada (dezenas de metros) |
| | - cols. 44-48: RN inicial |
| | - cols. 61-65: RN final |
| | - col. 72: sentido (nivelamento/contra-niv.) |
| registro final: | - col. 08: marcador de fim de linha ("8") |

FONTE: IBGE (2007)

QUADRO 4 – EXEMPLO DE FORMAÇÃO DE CIRCUITO COM AS LINHAS DA RAAP

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| |0..... |0..... |0..... |0..... |0..... |0..... |0..... |
| 14 | S. ROMAO - SAO Fco. - BSB MINAS - MONTES CLAROS D | | | | | | 35 |
| | 119030603 | + 187671 | 089 | 1175R | 1175S | N | |
| | 119030144 | - 187666 | 089 | 1175R | 1175S | C | |
| | 029100404 | - 520467 | 307 | 2348C | 2348D | N | |
| | 029100312 | + 520472 | 308 | 2348C | 2348D | C | |
| | 8 | | | | | | |
| 14 | ENTRC. BSB DE MINAS - PEDRAS DE MARIA DA CRUZ D | | | | | | 36 |
| | 039101011 | + 526405 | 265 | 2348D | 2350A | N | |
| | 039101022 | - 526408 | 265 | 2348D | 2350A | C | |
| | 049103230 | - 26430 | 172 | 2351L | 1177F | N | |
| | 049103240 | + 26425 | 171 | 2351L | 1177F | C | |
| 8 | | | | | | | |
| 14 | SAO FRANCISCO - PEDRAS DE MARIA DA CRUZ D | | | | | | 37 |
| | 049104025 | - 165127 | 155 | 1175R | 2352X | N | |
| | 049104031 | + 165122 | 155 | 1175R | 2352X | C | |
| | 049103805 | + 168675 | 133 | 2354E | 1177F | N | |
| | 049103809 | - 168669 | 134 | 2354E | 1177F | C | |
| 8 | | | | | | | |

FONTE: IBGE (2007)

É importante destacar que os desníveis armazenados nos arquivos DECAN são brutos, i.e., livres de toda e qualquer correção, cuja aplicação se faz na etapa de preparação do ajustamento — como mencionado anteriormente, a única correção aplicada nos desníveis da RAAP é a normal-ortométrica.

A Figura 33 mostra um aspecto determinante: as linhas de nivelamento armazenadas no BDG sob formato DECAN não atendem ao conceito de linha internodal. As respectivas RRNN de partida e chegada não são necessariamente pontos nodais da RAAP. O inverso se aplica às RRNN intermediárias dessas linhas, que podem ser pontos nodais. Tal organização visa preservar os arquivos DECAN originais, mas dificulta a preparação dos ajustamentos.

No AAGP, as linhas internodais para o ajustamento foram selecionadas manualmente a partir dos arquivos DECAN. Visto que a implementação da detecção semi-automática de pontos nodais e montagem de sub-redes da RAAP seria um componente importante dos procedimentos de integração de gravidade, tal atividade foi considerada parte integrante dos problemas específicos do SGB mencionados no Objetivo Principal desta Tese (Cap. 1). O programa desenvolvido para isso é apresentado juntamente com a integração de gravidade à RAAP, no Capítulo 4.

A codificação das RRNN de outras instituições incorporadas à RAAP, mencionadas na seção 3.1.1, não teve tratamento homogêneo. A partir do início da informatização dos dados da RAAP, tais RRNN foram denominadas RNFPad (“fora dos padrões” do IBGE) e receberam nomenclatura no padrão da RAAP, com a série 9000. Este procedimento teve impacto particular no caso das estações maregráficas, já que inúmeras instituições fazem nivelamento nesses locais. Este é o caso de Imbituba, em que existem RRNN do IBGE, do IAGS, da extinta Portobras, da CDI, do Serviço Aerofotogramétrico Cruzeiro do Sul (SACS), e da Cia. Brasileira de Dragagem (CBD).

Há poucos anos, o IBGE passou a codificar as RNFPad no momento de sua detecção no caminho da construção das linhas novas, com códigos na seqüência das RRNN dessas linhas. Isso introduziu dificuldades adicionais no tratamento dos dados, e especialmente no caso da correlação de referenciais nas estações maregráficas.

Os diferentes modelos de codificação de RNFPad também introduziram problemas eventuais na integração das informações de nivelamento (arquivos DECAN) com as informações pontuais de RN – como altitude, data de implantação, e coordenadas – armazenadas em um arquivo único de formato específico,

denominado CIC. Eventualmente, a integração de dados de gravimetria (formato EST, seção 3.2) também foi afetada.

Além dos problemas de codificação, também foram detectadas inconsistências nos valores de altitude e coordenadas entre os arquivos de informações de RRNN (formato CIC) e de EEGG (formato EST). Exemplos extremos dessas inconsistências são apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 – INCONSISTÊNCIAS EXTREMAS ENTRE OS ARQUIVOS DE RRNN E EEGG

| RRNN | Arquivo | Altitude (m) | Dif. (m) | Longitude (W) | Dif. | Latitude (S) | Dif. |
|---------------------|---------|--------------|----------|----------------|--------|----------------|------------|
| 2294-A (8070823) | RRNN | 664,1352 | | 45° 15' 12,00" | | 13° 33' 36,00" | |
| | EEGG | 643,9900 | 20,1452 | 45° 15' 11,31" | 00,69" | 13° 33' 35,21" | 0' 00,79" |
| 2340-G (8070609) | RRNN | 713,7019 | | 46° 05' 08,00" | | 14° 29' 04,00" | |
| | EEGG | 713,4100 | 0,2919 | 46° 05' 24,21" | 16,21" | 15° 23' 17,47" | 54' 13,47" |

Fonte: IBGE (2007)

Até meados dos anos 1990, as coordenadas das RRNN eram geralmente extraídas de folhas topográficas (de 1:50.000 a 1:250.000), depois da locação aproximada através dos respectivos memoriais descritivos. Nesse processo, as coordenadas aproximadas das RRNN eram obtidas com resolução da ordem de apenas 1 minuto de arco. Atualmente, essas coordenadas são obtidas com navegadores GPS, com resolução de 1 segundo de arco.

Muitas RRNN antigas ocupadas nos levantamentos gravimétricos tiveram suas coordenadas sensivelmente aprimoradas nesses levantamentos. No entanto, nem todos os casos desse tipo de aprimoramento foram replicados no arquivo CIC. Em relação às altitudes, o sentido de degradação se inverte, em função do truncamento das altitudes utilizadas no processamento das linhas gravimétricas.

3.1.6 – Conexões internacionais

A Floresta Amazônica, e o próprio Rio Amazonas, limitam de forma decisiva as possibilidades de conexão da RAAP com as redes verticais dos países vizinhos a norte e noroeste, que são, a partir do extremo litoral norte brasileiro: Guiana Francesa, Suriname, Guiana, Venezuela, Colômbia e Peru. Existe registro de apenas uma conexão nestas fronteiras – a já citada ligação entre Brasil e Venezuela, em que foi detectada uma diferença de 3,5 m entre as respectivas

altitudes (HERNÁNDEZ et al., 2002, p. 326). É provável que parte considerável dessa diferença se deva a um ou mais erros grosseiros no grande trecho de 1.700 km de nivelamento não controlado por circuito (Figura 2), medido nos anos 1970, entre a cidade de Humaitá e a fronteira com a Venezuela (marco BV-8). O IBGE iniciou estudos, ainda não documentados, com base na utilização dos resultados de GPS sobre algumas RRNN desse trecho. De fato, parece haver um “salto” no comportamento das diferenças entre as ondulações geoidais do EGM96 e as obtidas com a expressão (47). Isso poderia confirmar a hipótese de erro grosseiro, mas ainda são necessárias análises adicionais. O IBGE já iniciou uma revisão das cadernetas originais, mas ainda não existem resultados conclusivos.

A partir da fronteira com a Bolívia, em direção sul, as possibilidades de vinculação são maiores. De fato, a última conexão de nivelamento geométrico (“travessia de rio”) foi feita em dezembro de 2002, entre as cidades de Guajará-Mirim, na margem direita do Rio Mamoré, em Rondônia (RO), e sua vizinha boliviana *Guayaramerin*, na margem esquerda (Figura 34).

Tais medições resultaram em uma diferença de $-32,37$ cm (IBGE, 2003), invertendo a situação detectada em 1952, por meio de medições na fronteira entre Corumbá e *Puerto Suárez*, quando se constatou $+16$ cm (ALENCAR, 1990). No entanto, tais comparações carecem de análises mais demoradas, em conjunto com uma reavaliação das redes boliviana e brasileira, à semelhança da que se apresenta no Capítulo 4.

Existem indícios de conexões antigas com Bolívia, Paraguay, Argentina e Uruguay, mas sua análise fugiu ao contexto desta Tese. Recentemente, Blanco Llerena et al. (2006) apresentaram um estudo das diferenças entre as altitudes uruguaias e brasileiras usando GPS sobre RRNN, nas cinco localidades mostradas na Figura 34. Os resultados dessa comparação variam de 57 cm a 20 cm, configurando duas áreas com valores distintos, levando aqueles autores a recomendar uma análise mais detalhada das informações das redes de nivelamento na região.

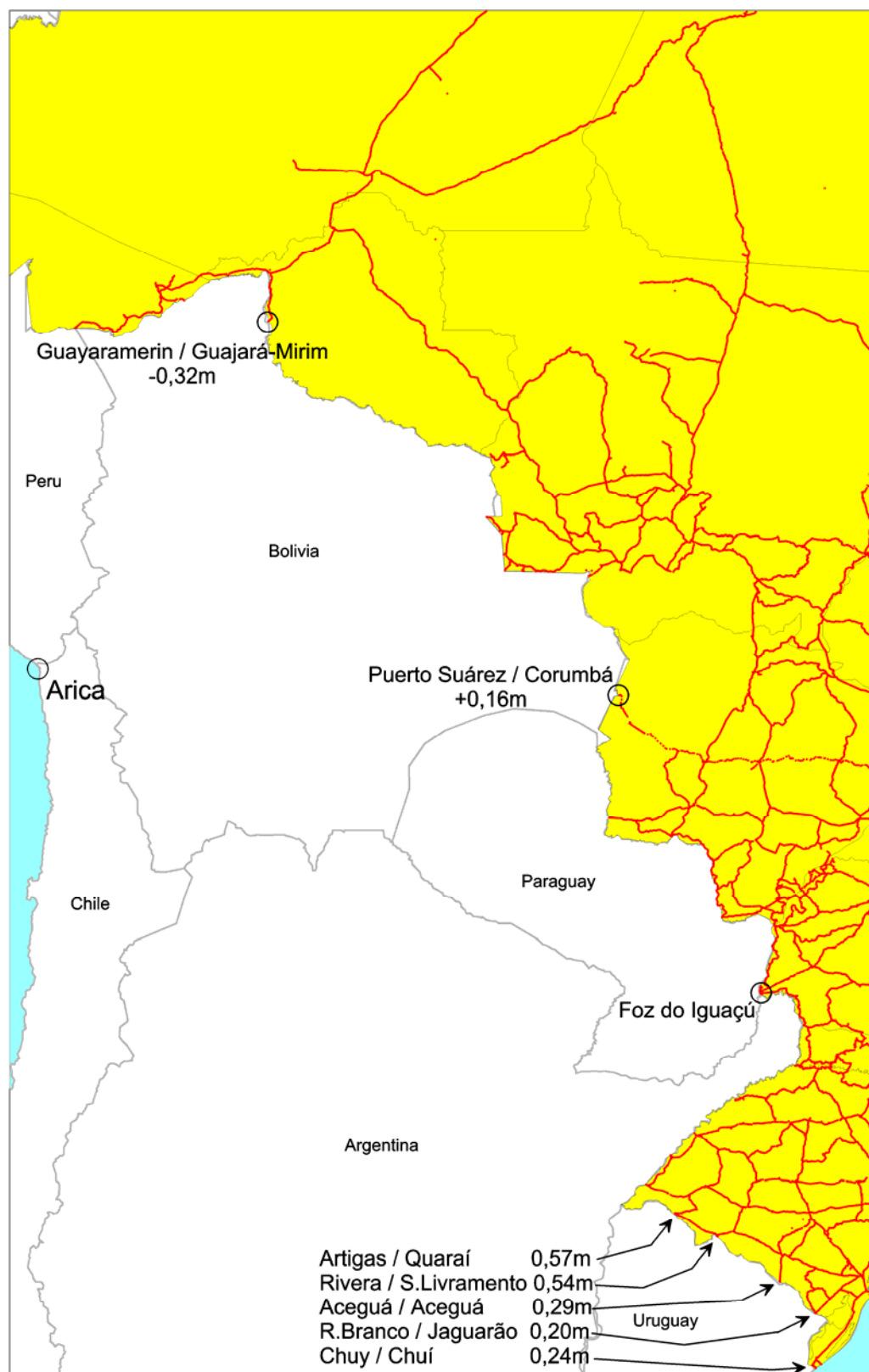


FIGURA 34 – ÁREAS DE POSSÍVEIS CONEXÕES INTERNACIONAIS DA RAAP

FONTE: adaptado de IBGE (2003)

NOTA: São mostrados os resultados obtidos pelo IBGE na comparação entre altitudes brasileiras e bolivianas via nivelamento geométrico, além dos resultados de Blanco Llerena et al. (2006) para a comparação com as altitudes uruguaias mediante GPS sobre RRNN

3.2. REDES GRAVIMÉTRICAS BRASILEIRAS

3.2.1 – Redes de Referência

A chamada Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB, Figura 35) foi estabelecida pelo Observatório Nacional (ON, 1986) a partir de levantamentos gravimétricos de diversas instituições, vinculados às vinte estações da Rede Internacional de Padronização da Gravidade (IGSN-71) existentes no território brasileiro. Detalhes sobre desenvolvimentos anteriores são dados por, e. g., Castro Júnior (2005, p. 39).

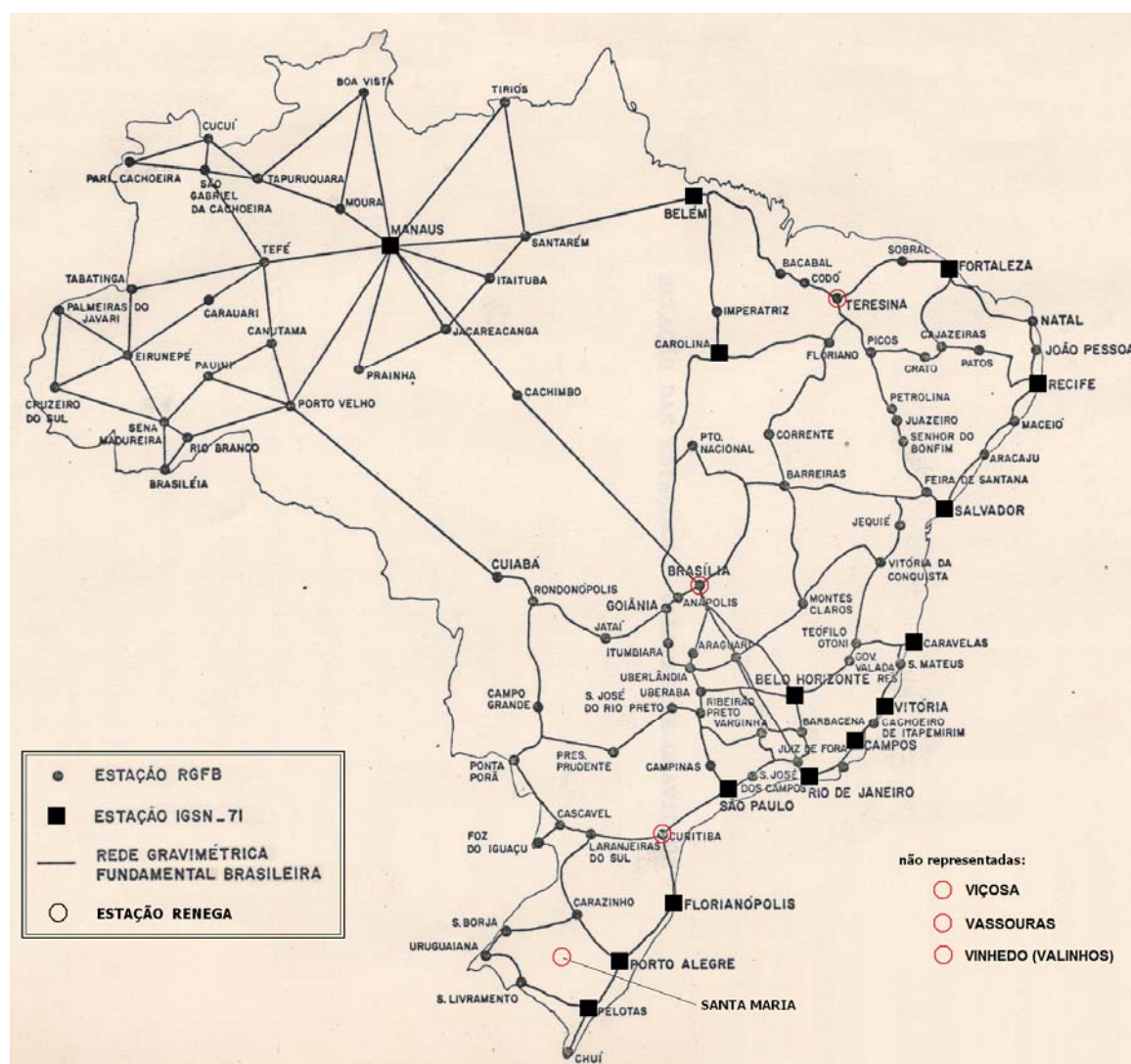


FIGURA 35 – IGSN-71 (BRASIL), RGFB E RENEGA

FONTE: adaptado de ON (1986) e Torge et al. (1994)

NOTA: apenas quinze estações da IGSN-71 encontram-se representadas

Posteriormente, no contexto do aprimoramento da IGSN-71 proposto pela IAG, 22 estações de gravidade absoluta foram estabelecidas na América do Sul pelo Instituto de Geodésia (IfE) da Universidade de Hannover, Alemanha, com colaboração de variadas instituições (TORGE et al., 1994). Dessas 22 estações, três foram consideradas pertencentes à Rede Internacional de Estações de Gravidade Absoluta (IAGBN), uma delas no Brasil (Brasília). Esta e as outras seis estações (Figura 35) estabelecidas pelo IfE em território brasileiro, em 1989, constituíram a chamada RENEGA, Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas (GEMAEL 2002, p. 247).

Subiza Piña e Sousa (2001) relatam a posterior compatibilização da RGFB à RENEGA, à qual se referem como “*datum* JILAG-3”, em alusão ao gravímetro absoluto utilizado pelo IfE. Posteriormente, Santos Júnior (2005) sugere novos procedimentos para o aprimoramento da referência gravimétrica nacional. Por fim, cabe mencionar a recente aquisição de gravímetros absolutos pelo Observatório Nacional e a intenção de se integrar as estações básicas do IBGE em um novo ajustamento da RGFB.

3.2.2 – Estações de Densificação

A gravimetria sistemática no IBGE teve início em 1991, com o principal objetivo de reduzir os "vazios gravimétricos" do Brasil (LOBIANCO et al., 2005). Estes, por sua vez, foram definidos com base no acervo de Estações Gravimétricas (EEGG) da base de dados da Sub-Comissão para Geóide e Gravidade na América do Sul (SCGGSA), da Associação Internacional de Geodésia (IAG) àquela época – situação apresentada na Figura 36. Estes autores também afirmam que alguns dos conjuntos de dados recebidos pela SCGGSA não possuíam informações sobre sistemas de referência, metodologia, instrumental, tipo de altitude ou reduções aplicadas.

Após 12 anos de trabalho, em cooperação com vários outros órgãos, o conjunto de EEGG determinadas pelo IBGE atingiu a configuração mostrada na Figura 37, em que se ressaltam as RRNN da RAAP ocupadas por tais levantamentos gravimétricos. Eventualmente, durante suas atividades de

densificação gravimétrica, o IBGE reconstitui a RGFB, nas áreas em que a distribuição de suas estações tornou-se deficiente (LOBIANCO, 2005, p. 108).

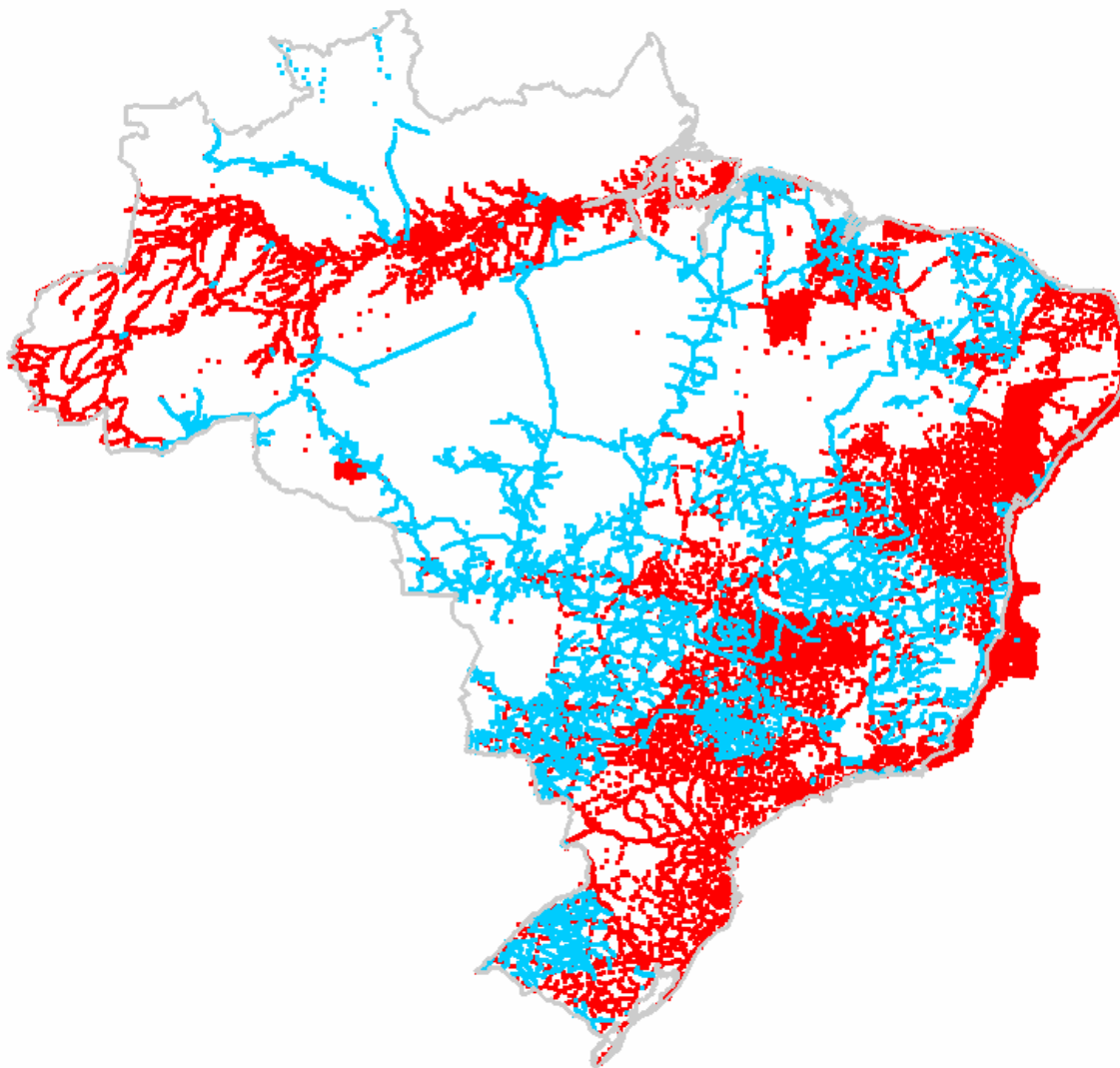


FIGURA 36 – ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS DETERMINADAS PELO IBGE E POR OUTRAS INSTITUIÇÕES

FONTE: SCGGSA (2006); IBGE (2007)

NOTA: azul: IBGE, vermelho: outras instituições

Da Figura 37, deduz-se que, ao longo da maioria das estradas por onde passam linhas de nivelamento da RAAP, existem levantamentos gravimétricos do IBGE ou de outras instituições. No entanto, poucas RRNN foram ocupadas, em função, por exemplo, de sua destruição. Tal situação permite lançar mão de processos de interpolação dos valores de gravidade, com base nas informações dos

levantamentos gravimétricos e nas coordenadas das RRNN, conforme recomendação do GT-III/SIRGAS já comentada. Apresenta-se um detalhamento dessa discussão no próximo capítulo.

Outro artifício possível para contornar a dificuldade de levar nivelamento e gravimetria até as estações da Rede de Referência SIRGAS é o estabelecimento de novas estações desta rede, sobre marcos da RAAP que já possuam valor de gravidade. Escolhendo-se adequadamente a localização dessas novas estações GPS, seria possível também melhorar a distribuição das estações da rede SIRGAS. A Figura 38 apresenta uma possível configuração de novas estações SIRGAS atendendo às duas condições mencionadas.

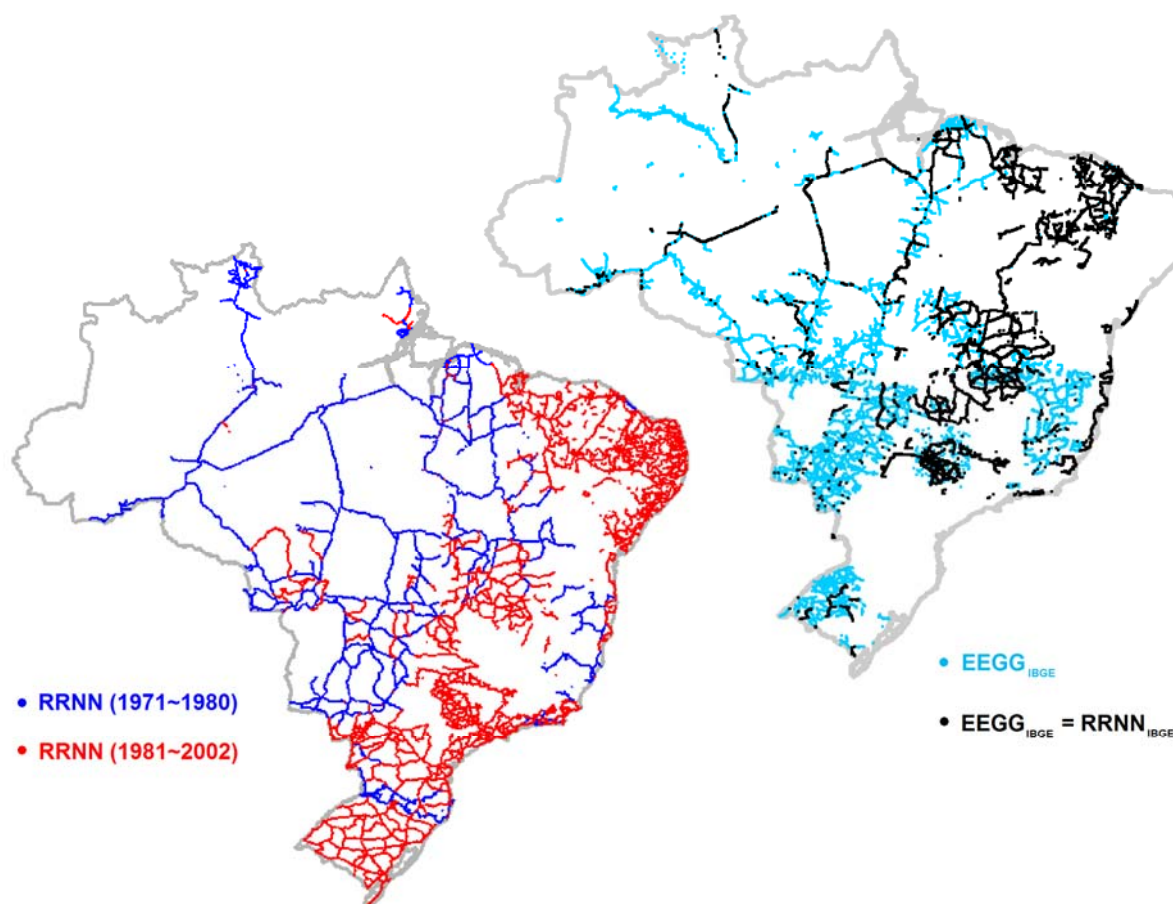


FIGURA 37 – EEEG DO IBGE COINCIDENTES COM RRNN DA RAAP

FONTE: IBGE (2007)

NOTA: a título de referência, as estações da RAAP mais recentes são mostradas no mapa esquerdo

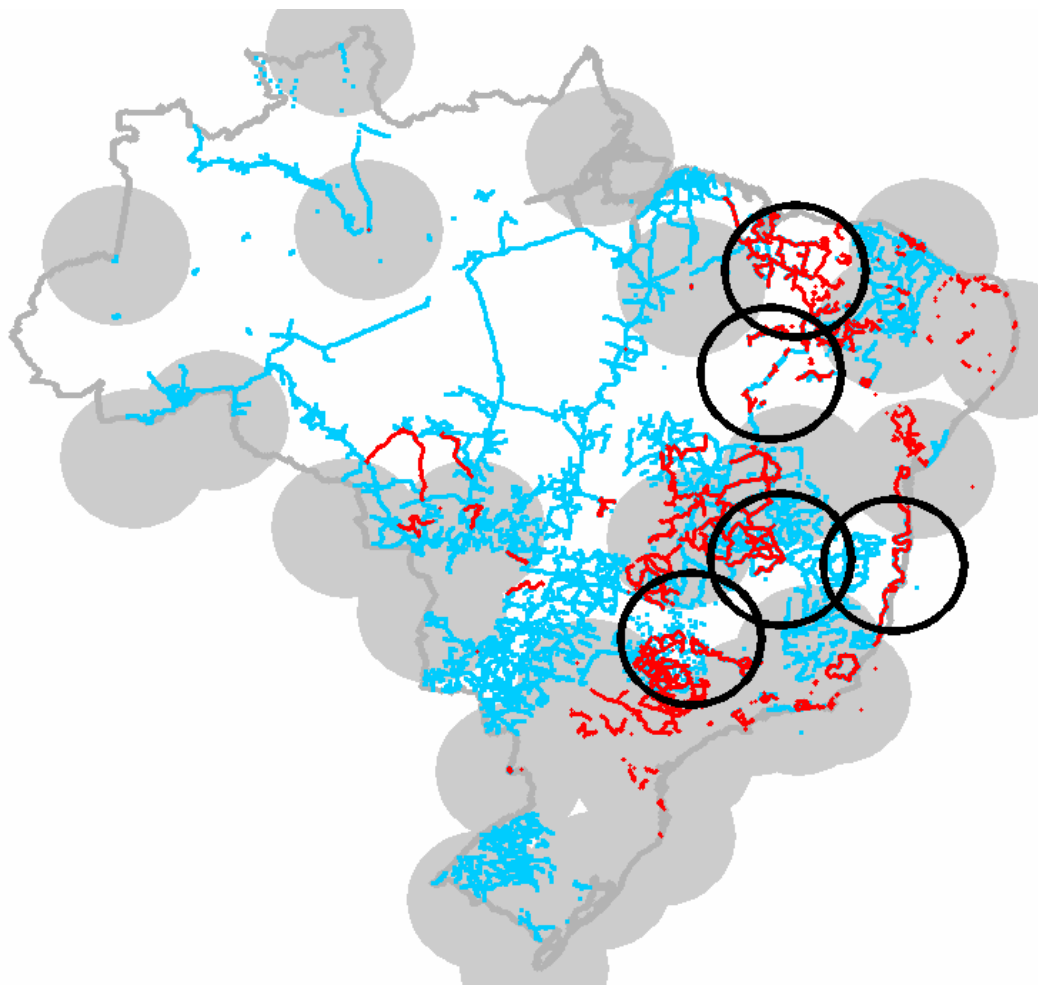


FIGURA 38 – POSSÍVEIS ESTAÇÕES DE COMPLEMENTAÇÃO DA REDE DE REFERÊNCIA VERTICAL SIRGAS

FONTE: o Autor (2008), com base em IBGE (2007)

NOTA: RRNN estabelecidas pelo IBGE a partir de 1987 : representadas em vermelho ; EEGG estabelecidas pelo IBGE a partir de 1991 : azul ; estações GPS SIRGAS : círculos cinza (raio arbitrário, apenas para definição dos locais das novas estações GPS propostas)

3.2.3 – Organização dos dados

Os dados pontuais de gravimetria do IBGE organizam-se em arquivos ASCII de acordo com o formato EST, especificado no Quadro 5. Ao contrário do que acontece no processamento das observações de nivelamento, as cadernetas de campo de gravimetria são calculadas em programa específico. Neste programa são criados arquivos secundários para o programa de processamento de linhas gravimétricas REDGRAV, no qual são aplicadas a tabela do gravímetro e as correções de deriva (estática e dinâmica) e de maré (CASTRO JÚNIOR, 2005, p. 124). Depois desse processamento, são criados os arquivos EST. Os exemplos

mostrados no Quadro 6 referem-se ao mesmo circuito da RAAP utilizado para apresentar os formatos de dados de nivelamento (Figura 33). Assim, as linhas gravimétricas referentes àquele circuito são DF-27, -90, -91, -92, -96.

QUADRO 5 – ESPECIFICAÇÃO DO FORMATO EST PARA GRAVIMETRIA

- col. 003-009: código da EG
- col. 012-028: nome da EG
- col. 031-035: código da RN (em caso de coincidência)
- col. 038-043: código da linha gravimétrica
- col. 046-057: latitude
- col. 060-072: longitude
- col. 075-083: altitude
- col. 087-095: gravidade observada (corrigida de derivas e maré)
- col. 098-104: anomalia ar-livre
- col. 107-113: anomalia Bouguer provavelmente padrão

FONTE: IBGE (2007)

QUADRO 6 – EXEMPLO DE LINHAS GRAVIMÉTRICAS DO IBGE

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 1 |
|---------|-------------------|-------|--------|--------------|---------------|----------|-----------|--------|--------|---|
| 8070321 | S. FCO. MONUMENTO | 1175R | DF0027 | -15 57 1.44 | - 44 51 28.53 | 481.8100 | 978240.38 | -32.83 | -86.75 | |
| 8070459 | DF0027-01 | 1175S | DF0027 | -15 57 14.40 | - 44 51 3.33 | 500.5000 | 978236.93 | -30.68 | -86.69 | |
| ... | | | | | | | | | | |
| 8070321 | S. FCO. MONUMENTO | 1175R | DF0090 | -15 57 1.44 | - 44 51 28.53 | 481.8100 | 978240.37 | -32.84 | -86.76 | |
| 8071647 | DF0090-01 | 2347T | DF0090 | -15 57 41.76 | - 44 49 29.01 | 520.9000 | 978235.00 | -26.68 | -84.97 | |
| ... | | | | | | | | | | |
| 0191285 | MIRABELA B | | DF0091 | -16 15 45.37 | - 44 9 51.12 | 800.0000 | 978189.29 | -.74 | -90.26 | |
| 8071634 | DF0091-01 | 2350A | DF0091 | -16 9 38.17 | - 44 12 54.37 | 839.6100 | 978177.14 | 4.27 | -89.68 | |
| ... | | | | | | | | | | |
| 0191185 | LONTRA B | | DF0092 | -15 54 11.16 | - 44 18 17.30 | 781.0000 | 978180.56 | 1.93 | -85.47 | |
| 8071684 | DF0092-01 | 2351A | DF0092 | -15 48 53.28 | - 44 20 26.19 | 715.0500 | 978200.12 | 5.32 | -74.70 | |
| ... | | | | | | | | | | |
| 8070321 | S. FCO. MONUMENTO | 1175R | DF0096 | -15 57 1.44 | - 44 51 28.53 | 481.8300 | 978240.36 | -32.85 | -86.76 | |
| 8071726 | DF0096-01 | 2352X | DF0096 | -15 56 19.32 | - 44 51 4.41 | 464.9900 | 978242.49 | -35.36 | -87.39 | |

FONTE: IBGE (2007)

O planejamento das linhas gravimétricas do IBGE não favorece o ajustamento das mesmas, sob alegação de que se trata de levantamentos de densificação. Na maioria dos casos, as linhas são iniciadas e terminadas em uma mesma EG básica, sem ocupação de EEGG já determinadas em outras linhas. Quando tais conexões inter-linhas acontecem, as informações repetidas são armazenadas nos respectivos arquivos EST, o que acaba por se refletir negativamente nos estudos desenvolvidos nesta Tese.

Finalizando esta descrição, cabe ressaltar que não foi possível inspecionar a rotina de redução de marés do programa REDGRAV. Tal inspeção permitiria identificar a estratégia de tratamento da maré permanente, em atendimento à necessidade de compatibilização desse tratamento entre todos os tipos de informação geodésica utilizados na presente Tese. Os comentários inseridos no código fonte mencionam que são utilizadas as fórmulas apresentadas por Longman (1959), com “coeficiente de elasticidade terrestre igual a 1,2”. Conseqüentemente, o programa parece fornecer valores de gravidade “média” – ressaltando-se novamente a necessidade de confirmação dessa hipótese.

3.3. REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA

3.3.1 – Observação do nível do mar

A RMPG tem estações uniformemente distribuídas ao longo da costa brasileira (Figura 30), com o objetivo de monitorar as diferenças entre o DVB e o NMM (LUZ, GUIMARÃES, 2003). O sensor primário (nível d'água, NA) de cada estação é digital – de pressão em Imbituba, Macaé e Santana, e de ultra-som em Salvador. Em algumas delas existem sensores digitais auxiliares, para registro de dados oceanográficos (temperatura e densidade da água, p. ex.) e meteorológicos. Em todas as estações o NA também é observado e registrado por um marégrafo convencional, cujo registro gráfico é posteriormente digitalizado. As estações encontram-se em operação desde (IBGE, 2007): 2001 (Imbituba), 1994 (Macaé), 2002 (Salvador), e 2005 (Santana). Todas essas estações foram ocupadas na Campanha GPS SIRGAS 2000.

Luz, Guimarães (2003) afirmam que as informações coletadas pela RMPG serviriam para acompanhamento da evolução tanto temporal como espacial do DVB. A primeira seria constituída pela correlação temporal entre as observações atuais de Imbituba e aquelas utilizadas para a definição do *Datum*. As observações atuais, por sua vez, seriam correlacionadas espacialmente com as observações das outras estações referentes aos mesmos períodos.

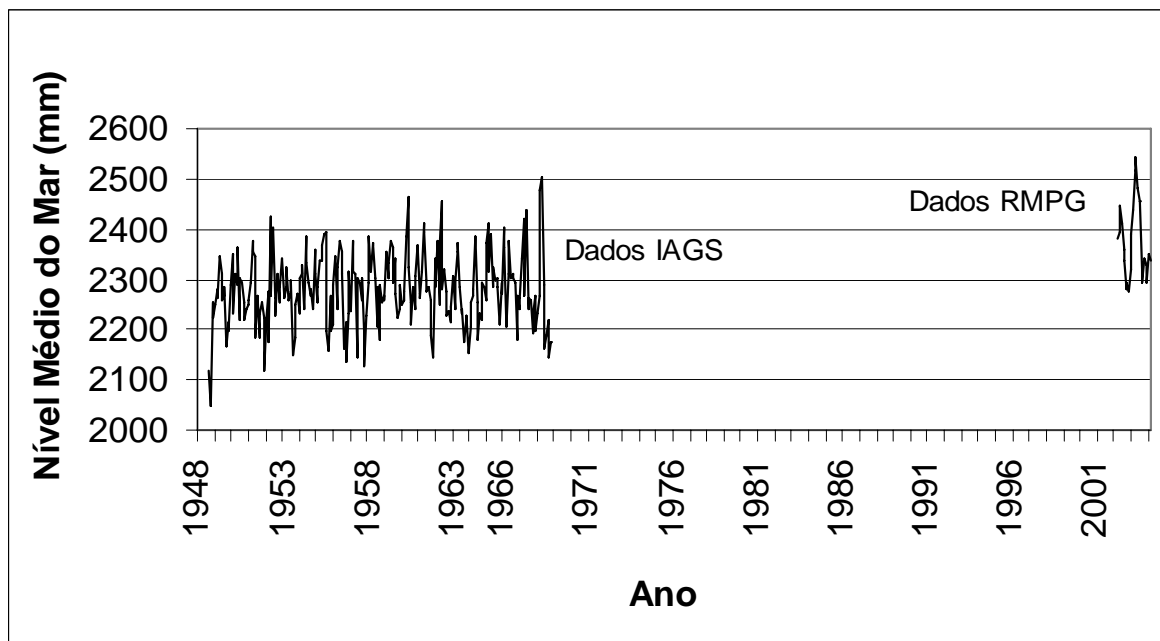


FIGURA 39 – EVOLUÇÃO DO NMM MENSAL EM IMBITUBA

FONTE: DALAZOANA et al. (2005)

NOTA: “Dados IAGS” referem-se à médias mensais armazenadas no PSMSL (1996)

Em relação à correlação temporal, aqueles autores apresentaram resultados errôneos, posteriormente corrigidos por Dalazoana et al. (2005). Esta correção é apresentada na Figura 39, onde também se observa a lacuna de aproximadamente 30 anos. Conforme mencionado anteriormente, maregramas referentes ao período 1986-1992 foram obtidos pelo IBGE junto à CDI. O Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS) do CPGCG/UFPR vem desenvolvendo estudos para a digitalização semi-automática daqueles maregramas. Com isso, a grande lacuna mostrada na Figura 39 será reduzida. Além disso, poderá ser confirmada a estimativa de elevação de 2 mm/ano do NMM em Imbituba (DALAZOANA, 2005).

Quanto à correlação espacial, a Figura 40 mostra dados de um mesmo período (janeiro-abril/2003) das três estações da RMPG então em operação. As observações brutas dos marégrafos digitais, com intervalo de amostragem de 5 minutos, foram filtradas para obtenção, inicialmente, de valores horários (PUGH, 1987) e, sucessivamente, dos valores semanais apresentados no gráfico. Observa-se que a influência meteorológica é significativa em Imbituba, cujos eventos também influenciam o nível médio em Macaé. Luz, Guimarães (2003) já afirmavam que a

estabilidade do nível médio em Salvador poderia indicar sua adequação para integração com observações de altimetria por satélites.

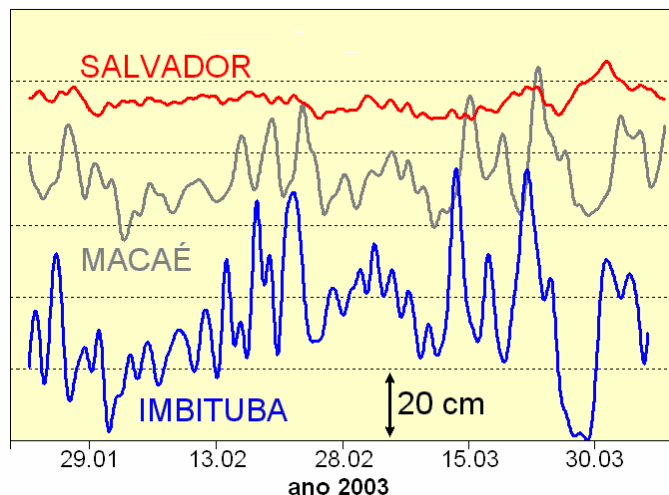


FIGURA 40 – NÍVEIS MÉDIOS SEMANAIS NAS ESTAÇÕES DA RMPG EM 2003

FONTE: Luz, Guimarães (2003)

3.3.2 – Níveis de referência

A importância do controle geodésico das estações maregráficas é ilustrada na Figura 41, que mostra a subsidência de uma das RRNN estabelecidas pelo IBGE na EMEC, Estação Maregráfica Experimental de Copacabana (LUZ, GUIMARÃES, 2003). A detecção de tal subsidência foi possível em função da inclusão de outras RRNN no nivelamento periódico daquela estação, mas vários outros cenários poderiam ser hipoteticamente associados a tais resultados, tais como:

- a) caso o controle consistisse apenas do nivelamento entre a RN 2969-F e a régua, e esta também sofresse subsidência, por estar instalada na mesma estrutura instável, não seria possível a discriminação desse movimento; ou
- b) caso a subsidência tivesse abrangência espacial mais ampla, mesmo a inclusão de várias outras RRNN não evidenciaria claramente o problema – que poderia ocorrer, por exemplo, no caso de circuitos de nivelamento estabelecidos em instalações portuárias relativamente recentes, com extensas áreas de aterros ainda não consolidados.

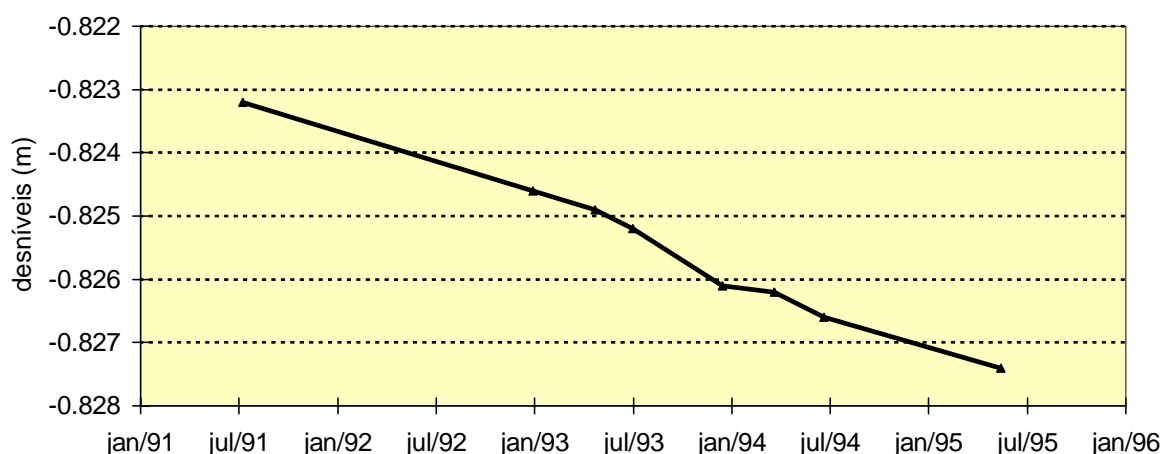


FIGURA 41 – EVOLUÇÃO DO DESNÍVEL ENTRE AS RRNN 1033-A E 2969-F

FONTE: LUZ, GUIMARÃES (2003)

Portanto, a correta discriminação entre as variações do NMM e eventuais movimentos verticais das estruturas, dos solos e da própria crosta terrestre deve ser garantida com a instalação de estações CGPS. No caso de Imbituba, a estação não contínua “IMBI”, estabelecida pelo CPGCG em 1997, foi reocupada em 2000 (durante a campanha SIRGAS), 2005 e 2007. Dalazoana (2005) analisa detalhadamente tais ocupações (exceto a mais recente), chegando a resultados não conclusivos que indicam subsidência de 0,2 mm/ano a 1,6 mm/ano (id., p. 86-88), correspondentes à aceitação ou rejeição de uma campanha específica. Com isso, recomenda que estimativas adequadas sejam obtidas somente a partir de uma estação contínua. Uma estação assim caracterizada foi instalada pelo IBGE apenas em dezembro de 2006, a qual recebeu a denominação “IMBT”. O vínculo entre as duas estações foi realizado por equipes do LARAS/CPGCG nas campanhas de junho e setembro de 2007 (UFPR, 2007), cujas observações GPS encontram-se em processamento no IBGE.

Usualmente, as observações do marégrafo são referidas à posição geocêntrica da estação CGPS, mediante a inclusão desta nos nivelamentos de controle da estação maregráfica. Tais nivelamentos são discutidos a seguir.

Conforme discutido anteriormente, a estação maregráfica que deu origem ao DVB-I teve nivelamentos freqüentes e regulares ao longo das décadas de 1950 e 1960. Na maior parte desse período, a rede local de nivelamento tinha pelo menos

6 RRNN, dentre as quais a RN 4X, à qual se atribui o papel de “RN fundamental” da RAAP (e. g., LOPES, 2006, p. 18), com base na descrição de Alencar (1990).

A RN 4X foi incluída na rede de controle local até 1952, quando os relatórios de inspeção do IAGS acusam sua destruição. No entanto, esta RN foi reconstruída posteriormente, e os nivelamentos do IAGS também registraram sua nova posição. Tal fato não teve maiores repercussões para a operação da estação maregráfica ou para a materialização do *datum*, já que existiam outras RRNN mais adequadas – especialmente a RN IAGS-3, incluída no circuito de nivelamento do IBGE em março de 1980 (Figura 28). Devido à forma com que foi estabelecida e ao cuidado das autoridades portuárias com sua manutenção, esta RN permaneceu intacta até julho de 2005, quando a estrutura em que se achava construída foi demolida. No entanto, foi possível proceder ao estabelecimento de uma nova RN vinculada à RN IAGS-3, de forma a preservar a materialização do *datum*. Assim, faz-se necessário um trabalho de divulgação, a começar pela própria Administração da CDI, acerca da real importância da RN 4X.

Já o IBGE realizou operações de nivelamento na região do DVB-I em 1946 (antes da instalação do marégrafo, como já mencionado), 1980, 1986, 1995, 2001 (quando os equipamentos digitais foram instalados), 2002 (instalação de uma segunda régua junto ao marégrafo). Nestes nivelamentos, porém, nem sempre foram ocupadas as mesmas RN.

Dalazoana (2005, p. 65) faz uma revisão detalhada desses nivelamentos, incluindo os resultados das medições realizadas por equipes do CPGCG em 1998 e 2005. A mesma autora destaca a escassez de repetições nos nivelamentos realizados após 1971.

Posteriormente, o LARAS/CPGCG realizou novas campanhas de controle geodésico em Imbituba, de abril a setembro de 2007 (UFPR, 2007). Além da já citada vinculação entre a antiga estação GPS não contínua “IMBI” e a recém instalada estação CGPS “IMBT”, foram realizados nivelamentos no entorno imediato dos marégrafos, a aferição dos mesmos via teste “Van de Castele”, e a densificação gravimétrica no entorno das lagoas vizinhas. A descrição desta última atividade é feita por Freitas et al. (2007).

A Figura 42 apresenta os resultados da aferição dos marégrafos realizada em 16/06/2007, bem como os resultados das aferições anteriores (2002, 2003 e 2005). Considerando que a resposta teórica ideal teria a forma de retas horizontais, observa-se que existem problemas nos dados do sensor digital. Além disso, a Tabela 8 mostra uma clara tendência de acréscimo da diferença entre os dados do sensor digital e da régua – isto é, um aparente “afundamento” do sensor digital de aproximadamente 11 mm/ano em relação ao zero da régua. Nestas estimativas foi desconsiderado o resultado para o teste de 2003, em virtude de seu aparente desacordo com os demais, e apesar de seu menor desvio-padrão.

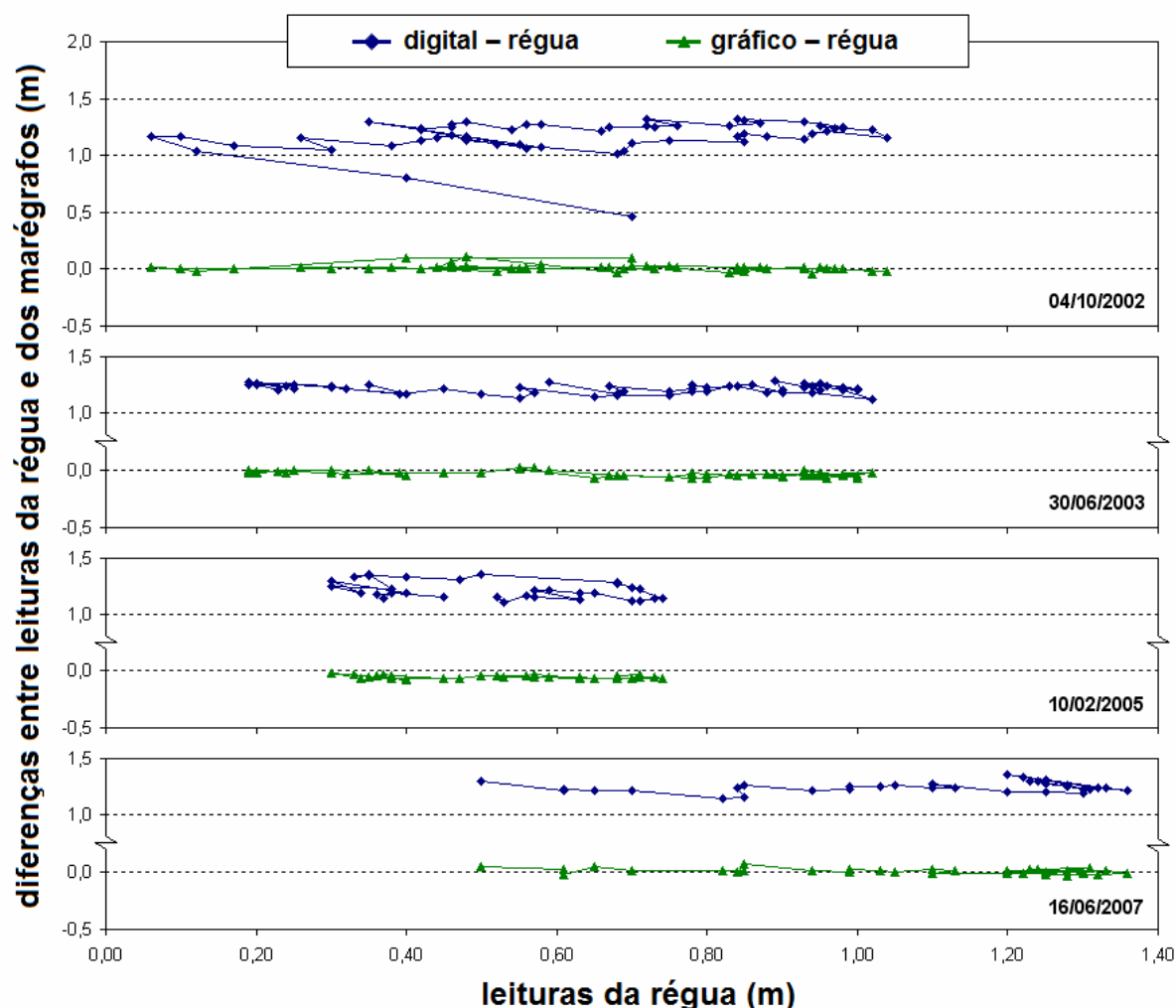


FIGURA 42 – GRÁFICOS DOS TESTES “VAN DE CASTEELE” DE 2002 A 2007 EM IMBITUBA
 FONTE: IBGE (2007); UFPR (2007)

TABELA 8 – RESULTADOS DOS TESTES “VAN DE CASTEELE” DE 2002 A 2007 EM IMBITUBA

| | gráfico – régua (cm) | | digital – régua (cm) | | |
|------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------|
| | média | desv.-padrão | média | desv.-padrão | tendência |
| 04/10/2002 | +1,5 | 2,8 | +119,0 | 8,2 | |
| 30/06/2003 | -2,6 | 2,4 | +121,3 | 3,8 | |
| 10/02/2005 | -4,9 | 1,5 | +121,5 | 7,5 | 10,6 mm/a |
| 15/06/2007 | +1,2 | 2,3 | +124,1 | 4,6 | 11,1 mm/a |

FONTE: o Autor (2008)

NOTA: para o cálculo das tendências da diferença entre zeros da régua e do sensor digital, foi desconsiderado o resultado de 2003

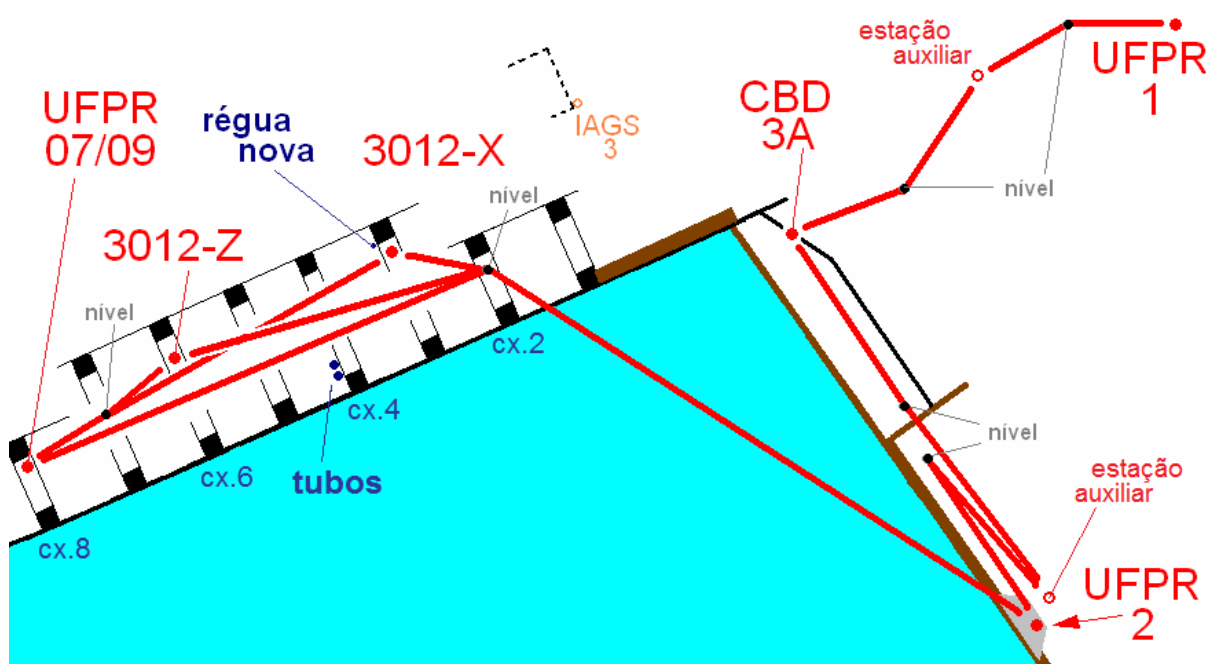


FIGURA 43 – NIVELAMENTOS NO ENTORNO IMEDIATO DOS MARÉGRAFOS

FONTE: adaptado de UFPR (2007)

NOTA: RN IAGS-3, representada na cor laranja, foi destruída em julho de 2005. Na mesma época, as RRNN UFPR-1 e UFPR-2 foram estabelecidas para preservar a materialização do DVB-I. A RN UFPR-07/09 foi estabelecida em junho de 2007 para melhorar a configuração de entrada do nivelamento abaixo do cais, já que a observação balanceada (R/V) da seção entre as RRNN 3012-X e Z é impossível, devido à inexistência de viga em posição adequada para o estacionamento do nível. A estação auxiliar explicitamente indicada serve para vencer um talude acentuado entre UFPR-2 e CBD-3A

A configuração do nivelamento realizado em 2007 no entorno imediato dos marégrafos pode ser visualizada em detalhes na Figura 43. Nestes nivelamentos, foram detectados possíveis movimentos verticais nas RRNN UFPR-1, CBD-3A e UFPR-2. No entanto, não foi possível realizar campanhas adicionais, para melhor

investigação do problema. Os nivelamentos realizados pelas equipes do CPGCG em 2005 e 2007 são resumidos na Figura 44. O procedimento de “travessia de rios” não apresentou resultados satisfatórios – o que não teve impactos significativos, já que sua realização teve como objetivo principal a demonstração do método e a coleta de dados para seu possível aprimoramento através do injuncionamento da distância (FREITAS, 2007, comunicação pessoal) com os resultados de determinações GPS cinemáticas (RTK), também levadas a cabo pela equipe do LARAS/CPGCG em junho de 2007.

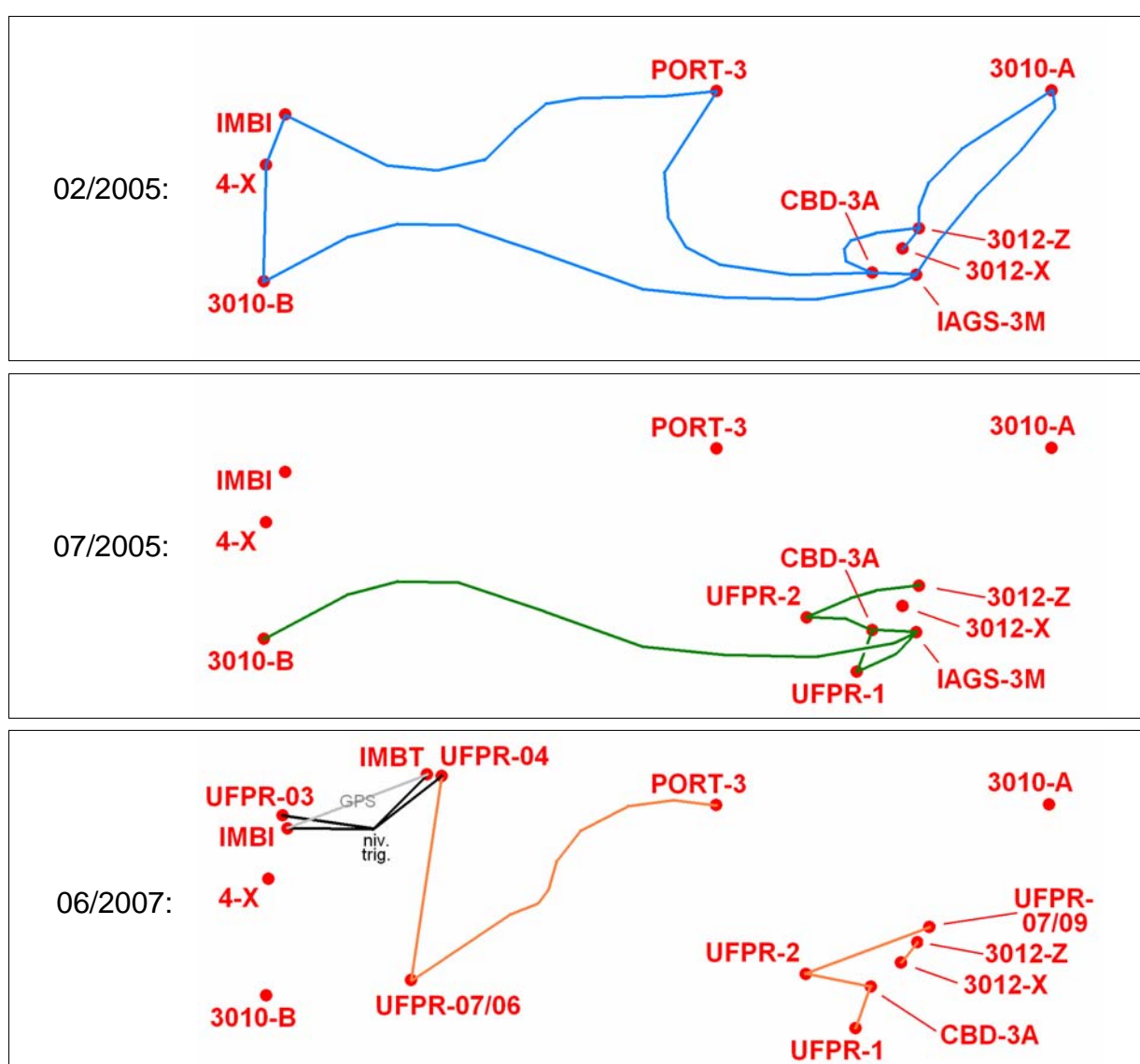


FIGURA 44 – NIVELAMENTOS DA UFPR NA ÁREA DO PORTO DE 2005 A 2007

FONTE: UFPR (2007)

NOTA: em 2007, além do nivelamento “de travessia” entre as RRNN UFPR-4 e UFPR-07/06, foram realizados nivelamentos trigonométricos de alta precisão (em abril, representados por linhas pretas) e a linha de base GPS IMBI-IMBT (também em junho, representada pela linha cinza)

3.4. MISSÕES ALTIMÉTRICAS

Os conceitos de Altimetria por Satélites (ALTSAT) discutidos no Capítulo anterior (seção 2.3.2.2, p. 66) vêm sendo realizados e aprimorados mediante diferentes missões, cuja cronologia é mostrada na Figura 45. No contexto desta Tese, cabe apresentar e ressaltar alguns detalhes – dos quais o mais importante é o papel essencial assumido pela missão TOPEX/Poseidon (T/P) como referência para a compatibilização com os dados das demais missões operacionais no mesmo período. Isto foi possível graças a uma conjunção de fatores (e. g., BOSCH, SAVCENKO, 2006):

- a) equipamentos para rastreamento por três sistemas independentes (SLR, GPS, DORIS) visando à determinação precisa de suas órbitas;
- b) radar altímetro operando em duas frequências, 5,3 GHz e 13,6 GHz (FU et al., 1994), aprimorando a correção da refração ionosférica; e
- c) altitude significativamente maior que a dos outros satélites altimétricos (aprox. 1.300 km contra 800 km), reduzindo o arrasto atmosférico e outros erros.

No final de 2001, seu sucessor Jason-1 entrou em operação, assumindo a mesma órbita a fim de permitir a inter-calibração. Em 2002, após alguns meses sendo seguido de perto por Jason-1, o satélite T/P foi movido para uma órbita que permitiu duplicar a cobertura espacial conjunta. Nesta nova órbita, o satélite T/P corresponde à missão estendida T/P-EM (*extended mission*), conforme Bosch, Savcenko (op. cit.).

A Figura 46 mostra a configuração espacial das trilhas dos satélites, isto é, as projeções de suas órbitas ao nível do mar, para o litoral centro-sul brasileiro. A resolução espacial observada nessa Figura é inversamente proporcional ao período de repetição de cada satélite – 9,91564 dias para T/P e Jason-1, e 35,00000 para os ERS e Envisat. Cada conjunto completo de dados entre repetições é denominado ciclo, e cada semi-revolução dos satélites, determinando uma trilha diferente, é chamada passagem.

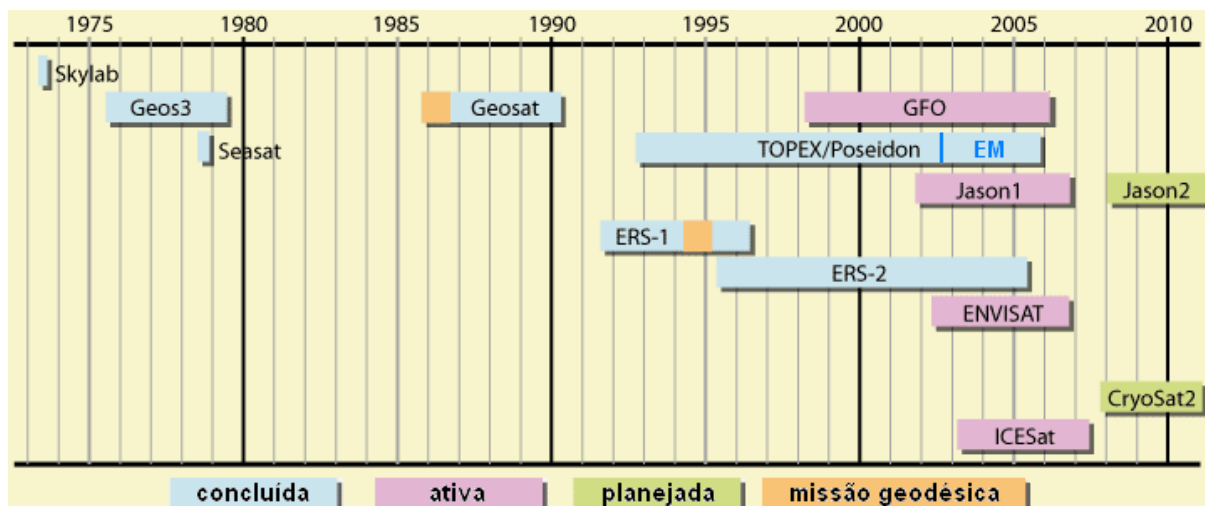


FIGURA 45 – CRONOLOGIA DAS MISSÕES ALTIMÉTRICAS

FONTE: adaptada de BOSCH, 2006b

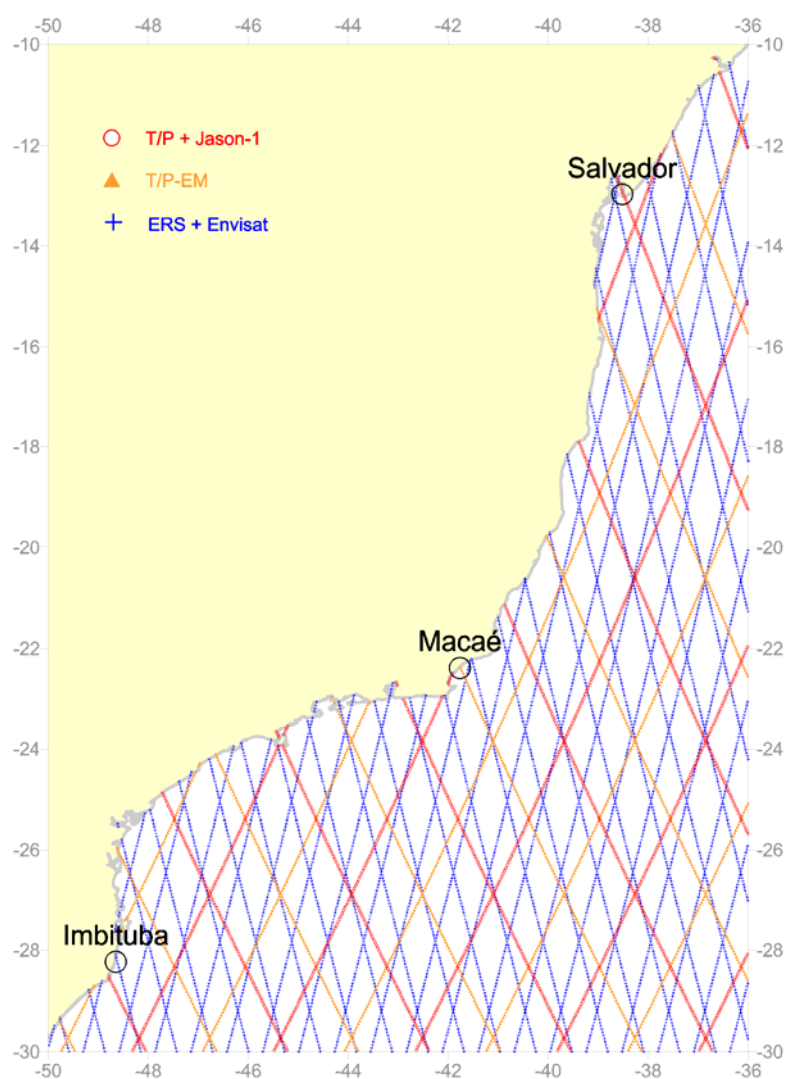


FIGURA 46 – ARRANJO ESPACIAL DAS TRILHAS DOS SATÉLITES CONSIDERADOS

Outro aspecto importante para os estudos desenvolvidos nesta Tese, observável na Figura 46, é a situação favorável das estações da RMPG em relação às trilhas dos satélites. Salvador encontra-se diretamente em uma trilha (passagem 100d) de T/P e Jason-1; o mesmo para Macaé, em relação à passagem 202d de T/P-EM, e Imbituba, 807a de ERS e Envisat. Tal combinação fortuita foi decisiva para a escolha da estratégia de integração entre informações da RMPG e das missões de ALTSAT, discutida no Capítulo 5, que permite uma vinculação mais direta dos diferentes níveis de referência, mostrados na Figura 47.

Nesta Figura, observa-se o papel fundamental das estações GPS permanentes (CGPS, de *continuous GPS*) das estações maregráficas para a vinculação das observações dessas estações ao mesmo referencial dos dados de ALTSAT – além da já mencionado detecção de eventuais movimentos verticais.

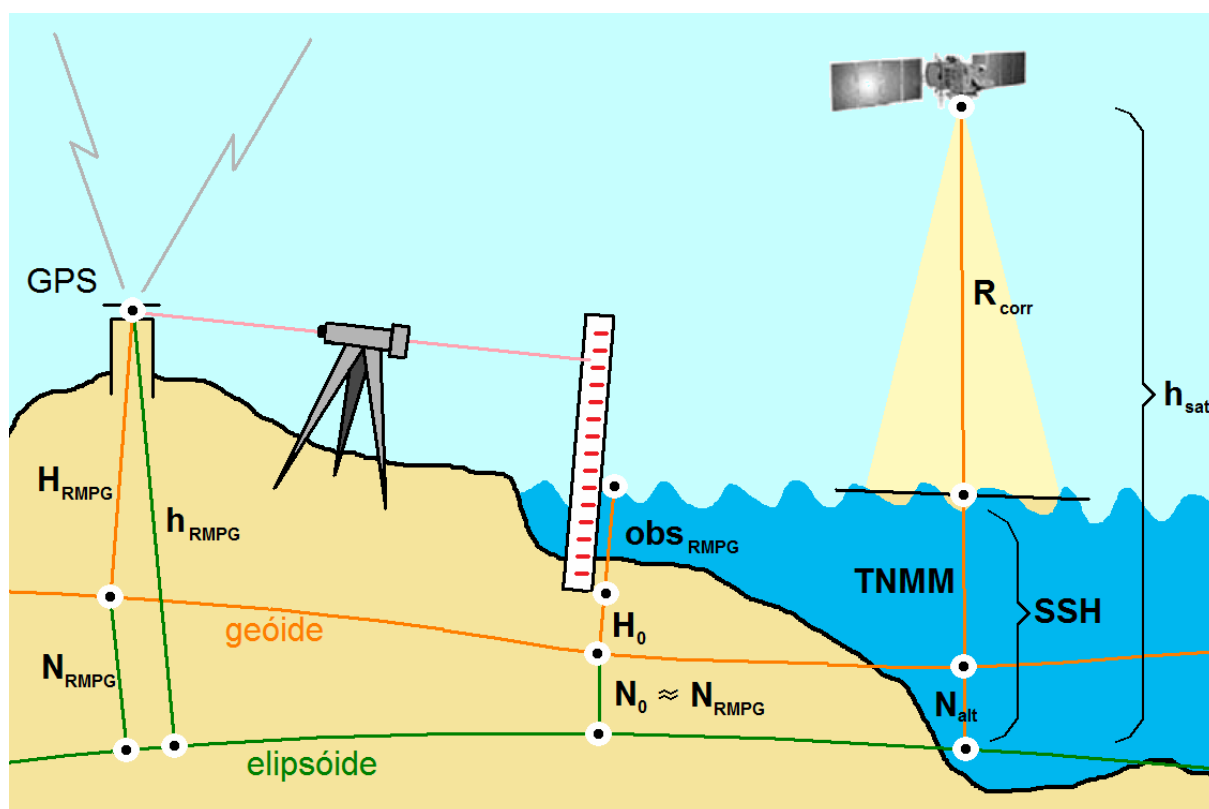


FIGURA 47 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA DOS DADOS MAREGRÁFICOS E ALTIMÉTRICOS

FONTE: adaptada de Bosch et al., 2008

A importância da caracterização das passagens como ascendentes ou descendentes (“a” ou “d”) reside na existência de erros fortemente correlacionados a

tal característica. Além disso, o sentido de progressão de cada satélite, i. e., se o mesmo prograda ou retrograda, altera a relação entre a configuração espacial das trilhas e sua caracterização ascendente ou descendente. Isso pode ser melhor visualizado no exemplo de identificação das passagens em Salvador, Macaé e Imbituba, dado anteriormente. As trilhas direcionadas para a costa sul-sudeste brasileira são descendentes no caso de T/P e Jason-1 (Salvador e Macaé), mas ascendentes para ERS e Envisat (Imbituba). A tentativa de utilização de dados de ALTSAT nas imediações da linha de costa deve levar tais relações em consideração, a fim de tratar adequadamente os efeitos indesejados da diferença entre as transições terra-água e água-terra.

Periódica, mas não freqüentemente, são divulgadas novas versões dos dados altimétricos de cada missão – os chamados GDR (*geophysical data records*), que incluem todas as correções mencionadas, além das várias outras não mencionadas. No caso do T/P, dois altímetros produziram dados (e. g., CHAMBERS et al., 2003); a compatibilização e combinação das duas séries de observações dá origem aos MGDR (*merged GDR*).

Nesta Tese, a distinção entre satélites e missões diz respeito à qualificação dos dados. Como discutido no Capítulo anterior, as informações produzidas pelo próprio satélite devem necessariamente ser complementadas com dados e modelos externos, que permitirão aprimorar suas órbitas e várias das correções discutidas anteriormente. Assim, dados de missão são as informações já processadas – os GDR –, enquanto que os dados de satélite referem-se a cada sensor. No caso dos altímetros, os dados brutos são as chamadas formas de onda, que descrevem a história da reflexão de cada pulso do radar altímetro na superfície terrestre ou oceânica. Os dados brutos de cada sensor são armazenados, de forma a permitir seu futuro reprocessamento, em vista do contínuo aprimoramento dos modelos de correção.

No caso da ALTSAT em áreas costeiras, o mais importante desses aprimoramentos resulta da reanálise (*retracking*) das formas de onda (e. g., DENG, FEATHERSTONE, 2006). O processamento padronizado dos dados brutos dos altímetros implica na comparação de cada forma de onda observada com a sua correspondente nominal, calibrada para as condições do oceano aberto. As formas

de onda observadas em regiões costeiras mostram distorções oriundas dos processos dinâmicos vigentes nas águas rasas, o que freqüentemente resulta em sua exclusão do processamento (BOSCH et al., 2008). Com a reanálise, recupera-se grande parte da informação altimétrica junto à costa.

Trata-se de procedimentos trabalhosos, ainda em discussão na comunidade científica. Assim, nesta Tese não foram considerados dados de ALTSAT reanalisados.

4. INTEGRAÇÃO DE GRAVIDADE À RAAP

4.1. FORMAÇÃO DE REDE PARA AJUSTAMENTO

Estas investigações incluem a análise de estratégias para montagem da rede de diferenças de geopotencial e seu ajustamento. Especificamente, o objetivo inicial era analisar a viabilidade de emprego da estratégia de particionamento da RAAP adotada no AAGP (seção 3.1.4, p. 88). Durante tal análise, foram constatados alguns problemas decorrentes da grande heterogeneidade temporal da RAAP na Região Sul do Brasil. Em decorrência, decidiu-se incluir o estudo dos efeitos dessa heterogeneidade. Cabe ressaltar que estas análises não incluíram a integração de gravidade, considerando apenas a mesma correção normal-ortométrica.

Foi desenvolvido um programa para o ambiente de computação matemática “octave”, com a mesma formulação matemática do AJNIV (ajustamento paramétrico), porém sem suas limitações computacionais. A fim de obter estimativas dos desvios-padrão das altitudes ajustadas sem a influência da altitude fixa inicial (injunção), i. e., como se resultantes de um ajustamento livre, foi introduzida no AJNIVOCT a modificação da MVC das altitudes ajustadas, mencionada na seção 2.3.3.4, equação (84).

Para a realização das análises discutidas a seguir, foi necessário definir conjuntos de dados correspondentes à solução separada e sucessiva de cada um dos problemas apontados anteriormente, isto é, as distorções oriundas do erro na seção 4P-P4P e do particionamento do AAGP (seção 3.1.4). Tal cuidado objetivou uma correta quantificação dos efeitos de tais problemas.

A caracterização detalhada desses conjuntos de dados é feita na seqüência. Antecipadamente, porém, cabe ressaltar que nenhum deles inclui as RRNN intermediárias das linhas internodais. Desta forma, evita-se a sobrecarga computacional com os parâmetros e observações referentes às RRNN intermediárias. O cálculo das altitudes dessas RRNN pode ser feito posteriormente, com uma simples distribuição do “erro de fechamento” oriundo da diferença entre as

altitudes dos respectivos pontos nodais inicial e final – mesmo procedimento empregado nos ajustamentos “históricos”.

Inicialmente, foi definido um conjunto com todas as linhas internodais do AAGP, sem discriminar entre linhas principais e linhas internas, e sem corrigir o problema na RN 4P. Esta configuração foi denominada LPLI1 (“Linhas Principais + Linhas Internas”), e teve como objetivo a avaliação dos efeitos do particionamento adotado no AAGP. Ou seja, em vez dos 80 ajustamentos em que foram calculadas as altitudes dos 741 pontos nodais do AAGP (Figura 31, p. 92), nesta Tese tais altitudes foram calculadas em apenas um ajustamento simultâneo.

Os resultados do ajustamento LPLI1 são resumidos na Tabela 9, que também indica os valores correspondentes ao ajustamento da rede principal do AAGP, a título de comparação. Os desvios-padrão das altitudes ajustadas em LPLI1 são mostrados na Figura 48.

TABELA 9 – RESUMO DOS AJUSTAMENTOS DAS REDES “AAGP-MODIFICADAS”

| | AAGP | LPLI1 (não particionado) | LPLI2 (inclusão 4P-P4P) |
|---|--------|-----------------------------|----------------------------|
| Número de observações | 56 | 1054 | 1055 |
| Número de altitudes ajustadas | 37 | 741 | 742 |
| Somatório dos quadrados dos resíduos, $V^T PV$ (cm ²) | 1,88 | 26,32 | 27,16 |
| Variância <i>a posteriori</i> da observação de peso unitário, $\hat{\sigma}_0^2$ (cm ²) | 0,0992 | 0,0841 | 0,0868 |

FONTE: Luz et al. (2007b)

A Figura 49 apresenta as diferenças entre as altitudes ajustadas de LPLI1 e do AAGP original para todas as RRNN incluídas em LPLI1. Essas diferenças situam-se entre -15,77 cm (em torno de 14° S, 57° W) e +18,53 cm (22° S, 48° W). É interessante notar que ambos extremos parecem estar correlacionados com anomalias da RAAP. A diferença negativa localiza-se na mesma região em que se detectaram as maiores diferenças entre altitudes do AAGP e ajustamentos “históricos” (Figura 30). Quanto ao extremo positivo, parece estar vinculado à deficiência geométrica da RAAP no oeste do Estado de São Paulo, que pode ser

apreciada na Figura 25. Isso ainda não pôde ser confirmado, em função de não ter sido possível a inclusão das sub-redes ajustadas após o AAGP.

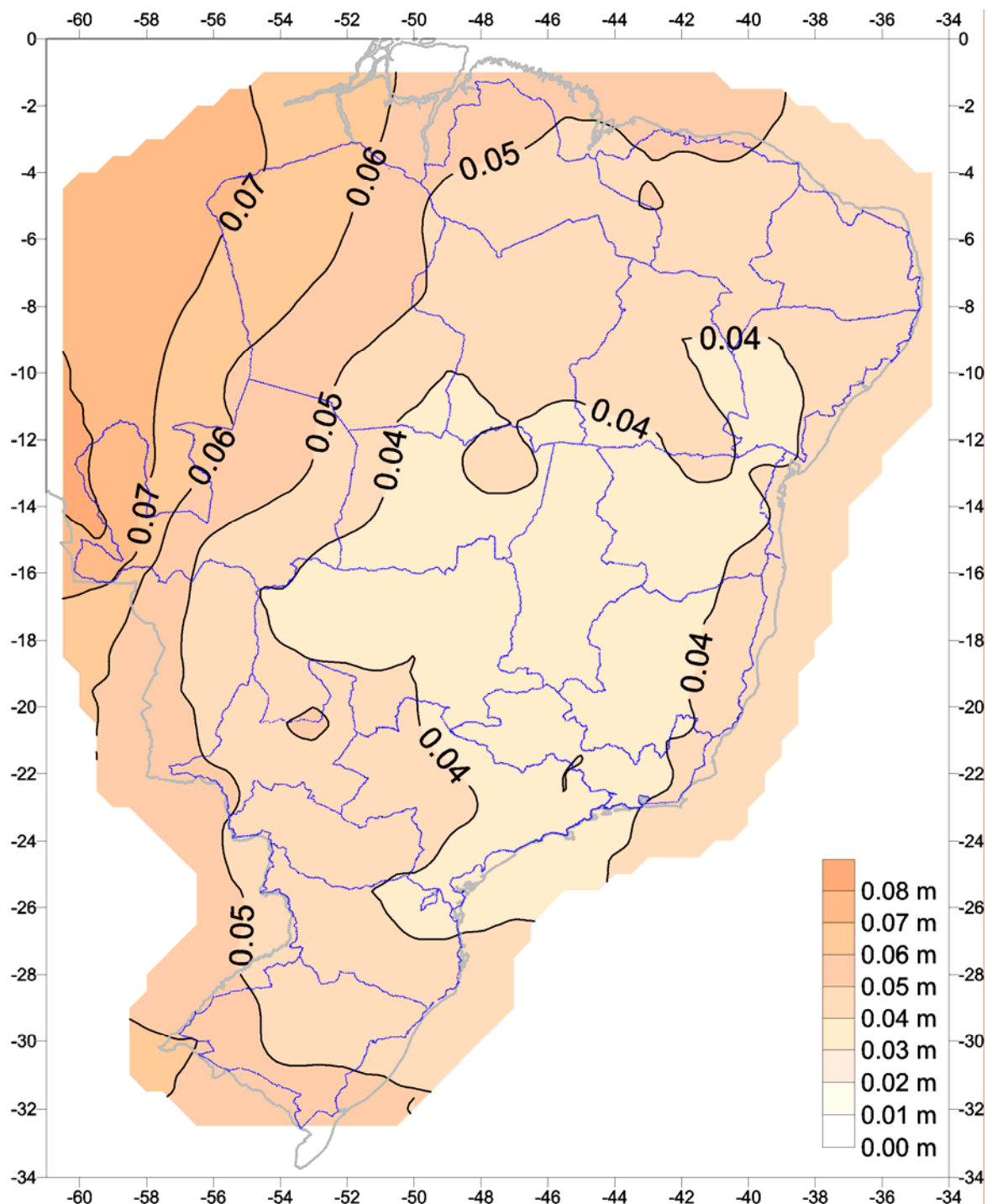


FIGURA 48 – DESVIOS-PADRÃO, REDE LPLI1

FONTE: adaptado de Luz et al. (2007b)

NOTA: a rede de macro-circuitos do AAGP é mostrada apenas como referência, já que os circuitos internos também foram considerados na rede LPLI1. Equidistância das isolinhas: 0,01 m

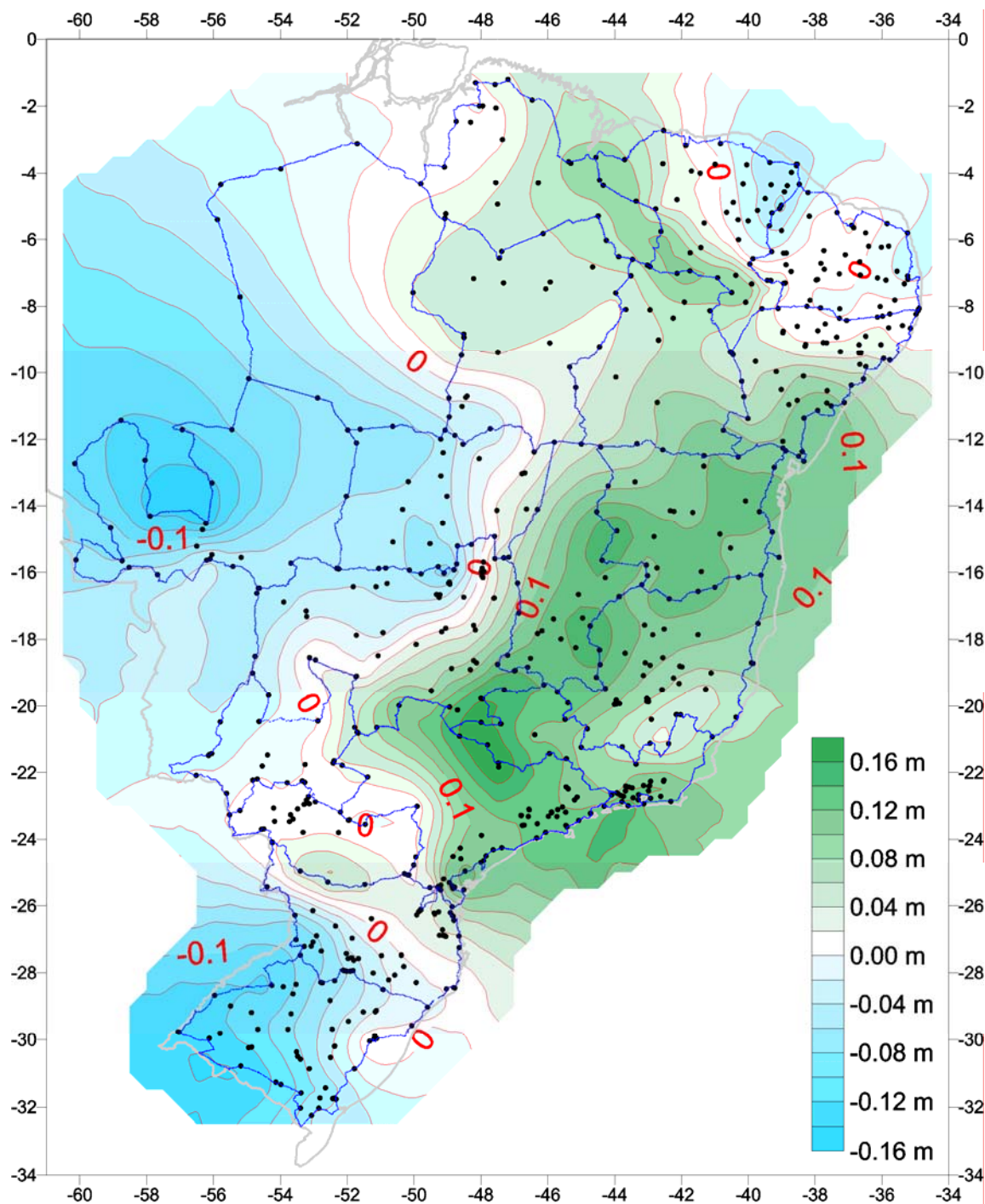


FIGURA 49 – DIFERENÇAS (M) ENTRE ALTITUDES, REDES AAGP E LPLI1

FONTE: Luz et al. (2007b)

NOTA: A rede de macro-circuitos do AAGP é mostrada apenas como referência, já que os circuitos internos (cujas RRNN nodais também são representadas como pontos pretos) foram igualmente considerados na rede LPLI1. Equidistância das isolinhas: 0,02 m

Cabe enfatizar que as diferenças mostradas na Figura 49 têm origem exclusiva na estratégia de particionamento adotada no AAGP, já que, neste e no

ajustamento da LPLI1, foram utilizados o mesmo modelo matemático e os mesmos dados. As isolinhas fechadas (efeito *bull-eye*) associadas a várias das linhas principais do AAGP (representadas em azul), nessa Figura, parecem indicar a contribuição das linhas internas, bloqueada em função daquele particionamento.

Portanto, considerou-se que as altitudes obtidas no ajustamento da rede LPLI1 solucionaram as distorções causadas pelo particionamento utilizado no AAGP. As mesmas passaram, assim, a servir de base para as análises descritas a seguir.

Como já mencionado na seção 3.1.4, o vínculo entre as RRNN 4P e P4P não foi considerado no AAGP, introduzindo um erro de 11,91 cm na linha principal P4P / 1777X, a sudoeste de Imbituba (Figura 28). Para a avaliação dos efeitos desse problema, ao conjunto LPLI1 foi acrescentada a ligação entre 4P e P4P, dando origem à rede LPLI2. Um resumo deste novo ajustamento também é mostrado na Tabela 9.

Na Figura 50 é possível observar que o problema na RN 4P teve um efeito de 2,5 a 3 cm na maior parte da rede do AAGP, ao norte do paralelo de 22°. Grande parte da RAAP no Rio Grande do Sul (RS) foi influenciada de 4 a 5,5 cm. Os efeitos mais severos daquele problema, acima de 7 cm, restringiram-se às RRNN das linhas “novas” ao sul de Imbituba (séries 1778 e de 2000 a 2002). O forte gradiente das diferenças, observável nessa Figura, confirma essa rápida atenuação, determinada pela consistência interna dos circuitos não envolvidos diretamente no problema.

O efeito conjunto dos dois aprimoramentos da rede do AAGP – eliminação do particionamento e inclusão do vínculo P4P / 4P – pode ser também apreciado na Figura 51, em que se apresentam as diferenças entre o nível médio do mar local em vários marégrafos e as respectivas altitudes referidas ao DVB-I, atualizando a Figura 4 (p. 9).

O próximo estudo diria respeito à homogeneização temporal da vinculação da RAAP à rede local materializadora do DVB-I, substituindo a linha de 1946 (RN 4X) com a linha de 1980 (IAGS-3), conforme discutido na seção 3.3.2. No entanto, não foi possível iniciar tal estudo, no contexto desta Tese, com toda a rede do AAGP. Nos testes apresentados no Capítulo 6, foi adotado esse “novo vínculo” com o DVB-I, mas a rede considerada é apenas uma pequena fração da RAAP.

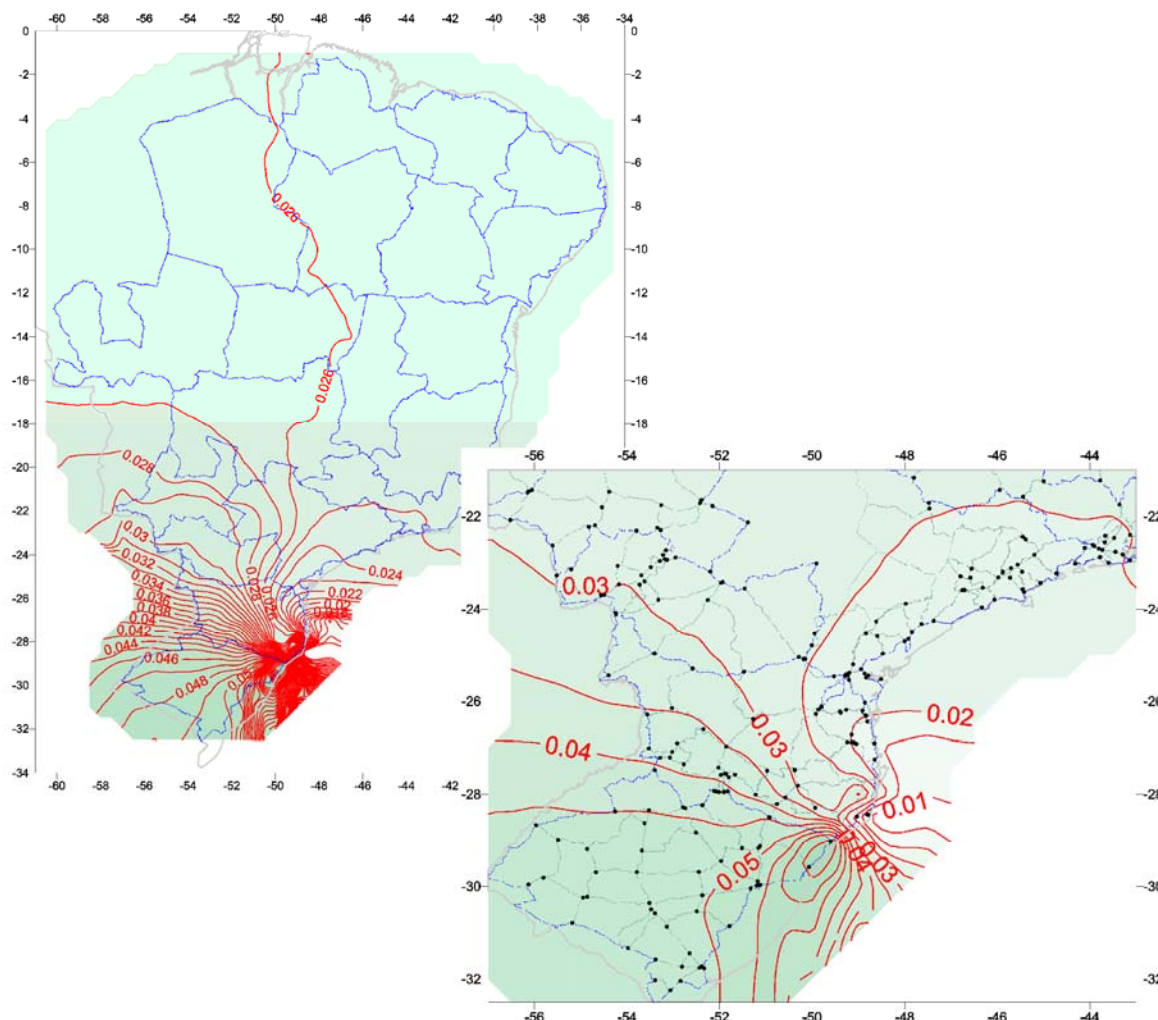


FIGURA 50 – EFEITOS DA INCLUSÃO DO VÍNCULO ENTRE 4P E P4P

FONTE: Luz et al. (2007b)

NOTA: Diferenças (m) entre as altitudes das redes LPLI1 (afetada pelo problema de 12 cm na RN 4P) e LPLI2 (problema corrigido), observando-se que seus efeitos mais severos restringem-se à vizinhança imediata a sudoeste de Imbituba. Eqüidistância das isolinhas: 1 mm

Outras discussões referentes à formação da rede para um novo ajustamento da RAAP seriam: a homogeneização geométrica, pois certos trechos mostram grandes variações nos tamanhos dos circuitos; e a inclusão das linhas não consideradas no AAGP, como os blocos ASUP-SP, apresentado anteriormente, e “Nortesul”. Este último prestou-se aos testes iniciais de integração de gravidade à RAAP, abordados na seção 4.3.

Em todas as discussões mencionadas, foi implicitamente aceita a montagem manual das respectivas redes, conforme aplicada para o AAGP e “linhas novas” ajustadas posteriormente. Uma das razões da não realização dos estudos sugeridos

– homogeneização temporal, geométrica etc – foi o esforço necessário à reconfiguração das respectivas redes. A fim de eliminar tal necessidade, a detecção automática de RRNN nodais e montagem das respectivas linhas internodais foi incluída no programa desenvolvido para integração de gravidade, apresentado a seguir.

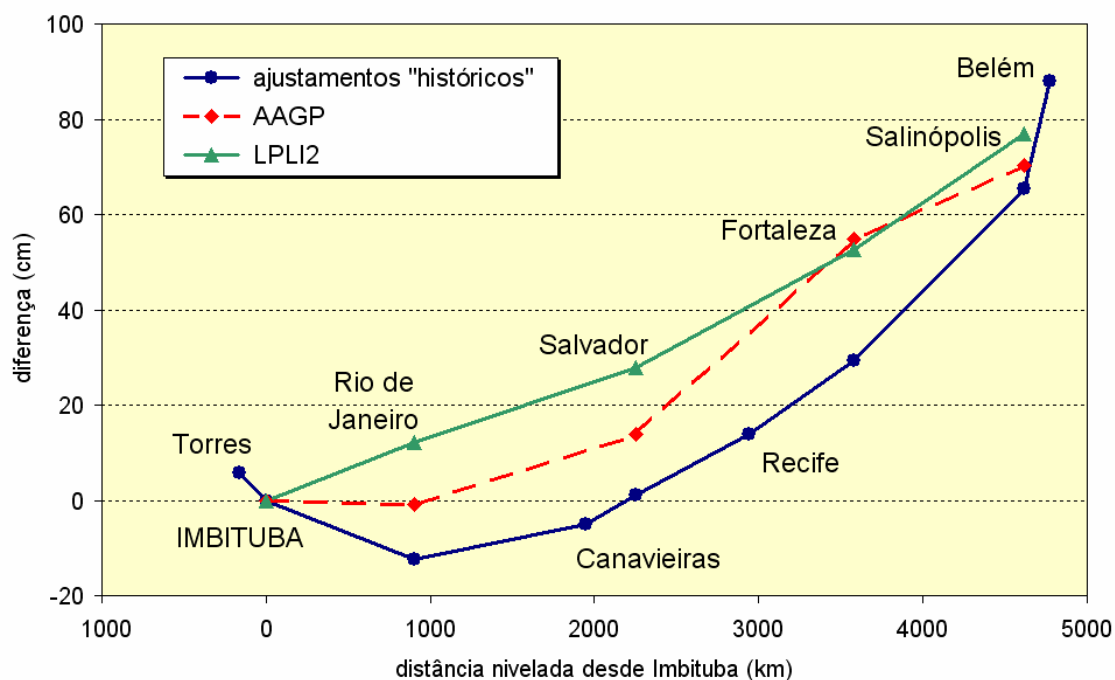


FIGURA 51 – DIFERENÇAS ENTRE ALTITUDES AO LONGO DA COSTA BRASILEIRA

FONTE: Luz et al. (2007b)

NOTA: Diferenças das altitudes referidas aos NMM locais em relação aos vários conjuntos de altitudes referidas ao DVB-I

4.2. SISTEMA COMPUTACIONAL IDNOS

Antes de discutir as dificuldades relacionadas à inexistência de informação gravimétrica nas RRNN da RAAP, foi necessário vencer as dificuldades nos casos em que a informação existe. A dissociação entre os levantamentos de grande parte das EEGG e RRNN do IBGE determinou também a descoordenação das respectivas bases de dados, e se constitui na causa principal dessas dificuldades.

O sistema computacional IDNOS foi desenvolvido, em FORTRAN, para vencer tais dificuldades, fazendo a pesquisa de valores de gravidade e coordenadas das RRNN envolvidas, e o cálculo da diferença de geopotencial para cada seção de nivelamento. Tais informações são organizadas em arquivos adequados ao ajustamento com o programa AJNIVOCT, apresentado anteriormente (seção 4.1). Com as altitudes dinâmicas ajustadas, uma nova passagem pelo IDNOS permite o cálculo das demais altitudes – normal, normal-ortométrica e ortométrica de Helmert, conforme seção 2.2.6.

Em sua versão atual, IDNOS também faz a montagem automática da rede de nivelamento formada pelos dados selecionados, detectando as verificações de abalo e discriminando as RRNN com suspeita de movimentação vertical. Em relação à detecção de pontos nodais, uma etapa ainda não implementada é a sinalização das heterogeneidades temporais. Posteriormente, estas heterogeneidades poderiam ser tratadas, juntamente com o cálculo dos erros de fechamento dos circuitos, mediante a criação de um índice de heterogeneidade característico de cada circuito.

O desenvolvimento de IDNOS foi precedido pela identificação de um bloco da RAAP em que as RRNN são recentes e foram ocupadas por gravimetria. Tal situação permitiu validar os resultados de IDNOS, e é apresentada a seguir.

4.3. ÁREA DE TESTES DE INTEGRAÇÃO GRAVIDADE-NIVELAMENTO

Antes do desenvolvimento do sistema IDNOS, foi identificado um bloco da RAAP (Figura 52) cujas linhas de nivelamento, relativamente recentes (1987-1992), são totalmente cobertas com informações gravimétricas diretas e homogêneas, oriundas de levantamentos padronizados do IBGE. Como se observa na Figura 37 (p. 103), poucos trechos da RAAP têm essa característica. A pretensão inicial era dispor de um conjunto de linhas da RAAP que também apresentasse acentuada variação de altitude e tivesse vínculo a uma estação maregráfica. As outras áreas que atendem parcialmente a tais requisitos não são espacialmente tão abrangentes como aquele bloco, o que acabou por determinar sua escolha, em função da importância da distância entre EEGG no caso da interpolação da gravidade.

Outro aspecto favorável nesse bloco era a existência de três estações CGPS ao longo ou nas vizinhanças de suas linhas, sendo duas delas pertencentes à Rede

de Referência SIRGAS 2000. Isso atenderia aos requisitos de eventuais testes de integração de informações de posição geocêntrica, como discutido na seção 2.3. Todavia, ao longo do desenvolvimento desta Tese, a realização de tais testes tornou-se inviável. Também não foi possível analisar detalhadamente a nova solução de coordenadas e velocidades da Rede SIRGAS contínua, recentemente divulgada (SEEMÜLLER et al., 2007). A Figura 53 mostra as velocidades associadas às altitudes elipsoidais de tal solução – consideradas isoladamente, as estações do bloco em questão apresentam grande variação de suas velocidades (BOMJ: $-1,8$ mm/ano; BRAZ: $-1,6$ mm/ano; MCLA: $-1,2$ mm/ano). No entanto, no conjunto das estações brasileiras, seus resultados podem ser considerados homogêneos. Por outro lado, antes que esses resultados possam ser aplicados no contexto do SVSIRGAS, será necessário investigar a possibilidade de efeitos locais (subsistência das estruturais prediais etc) em cada estação.

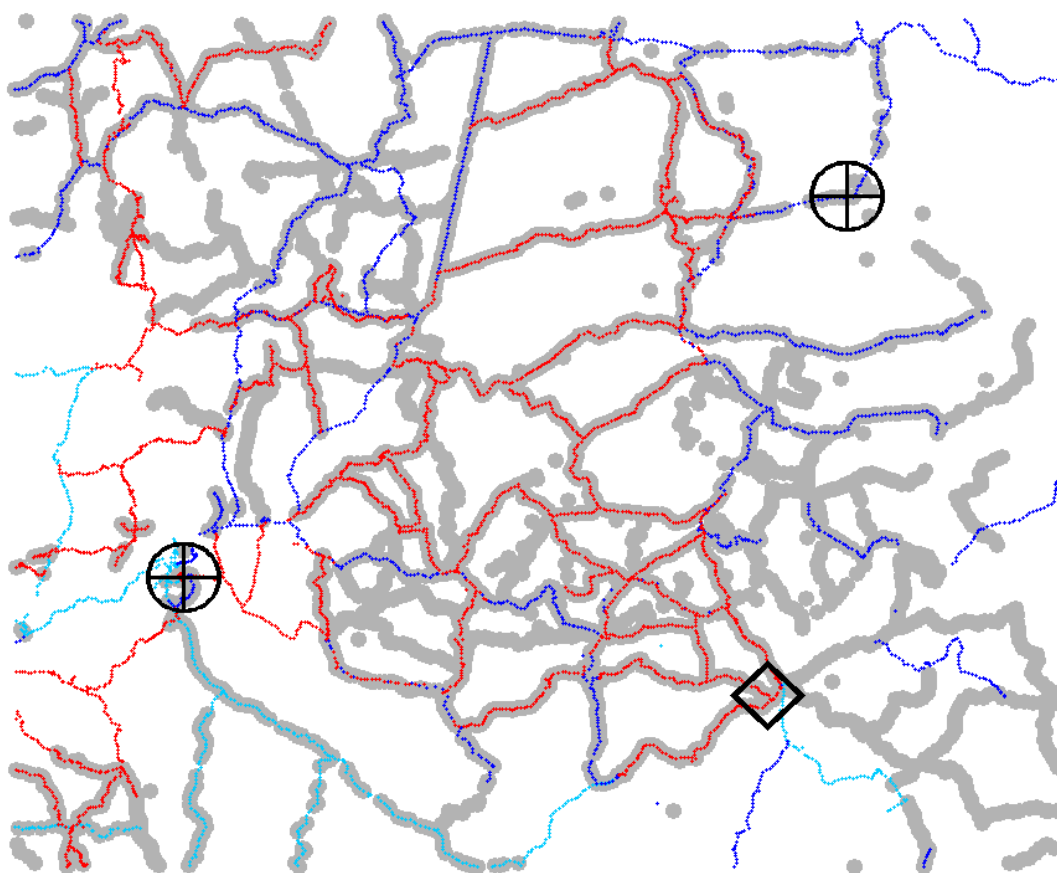


FIGURA 52 – ÁREA DE TESTES DE INTEGRAÇÃO DE GRAVIDADE À RAAP

FONTE: IBGE (2007)

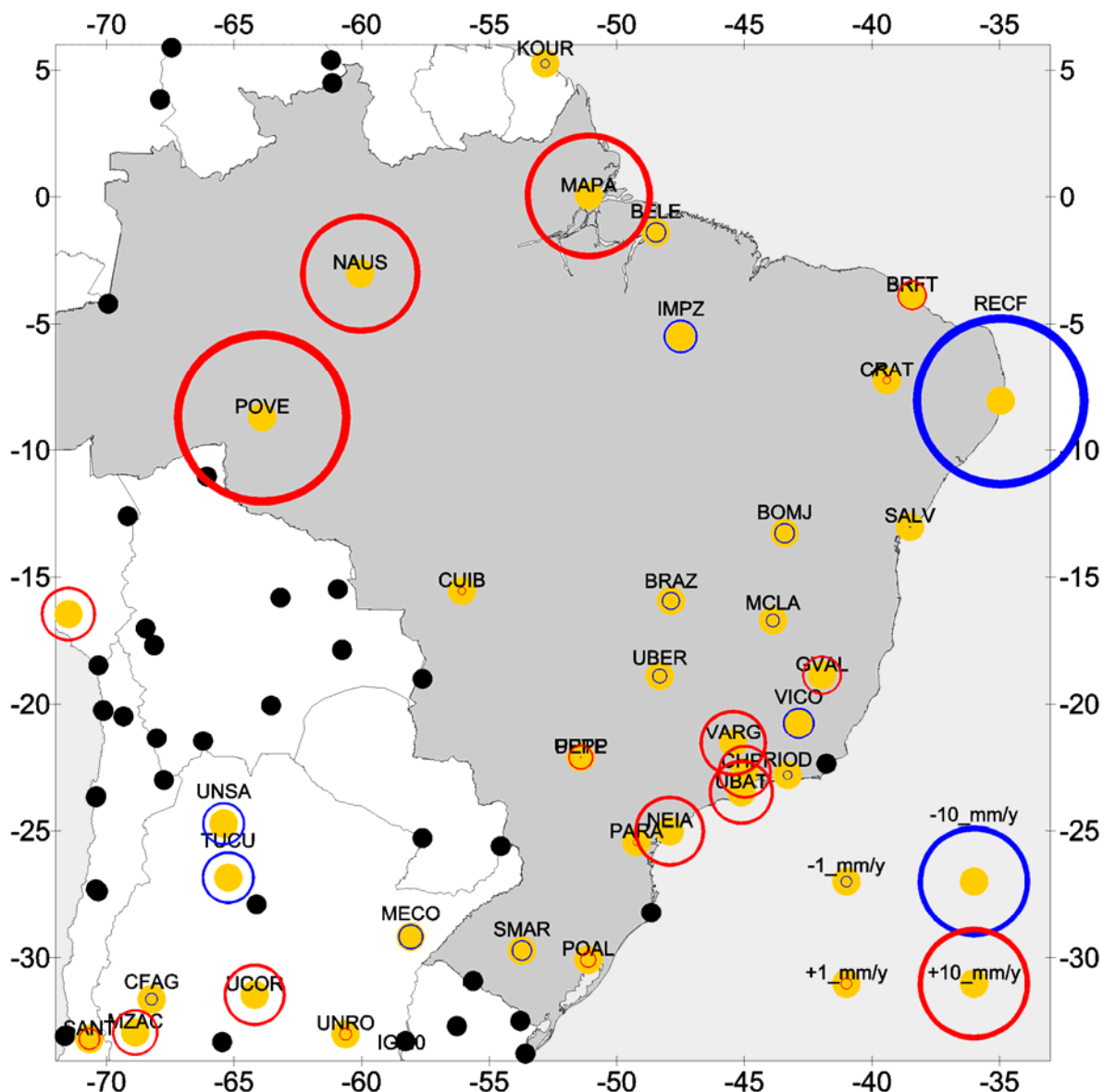


FIGURA 53 – VELOCIDADES VERTICAIS ASSOCIADAS À NOVA SOLUÇÃO SIRGAS

FONTE: adaptado de Seemüller et al., 2007

NOTA: os círculos pretos representam as estações da Rede SIRGAS 2000, enquanto os amarelos referem-se às estações CGPS utilizadas para o cálculo das novas coordenadas e velocidades. Os círculos azuis (negativos) e vermelhos (positivos) têm raio proporcional ao módulo da velocidade vertical (mm/ano). Observa-se significativa subsidência em Recife (RECF), assim como expressiva elevação nas estações amazônicas (POVE: Porto Velho; NAUS: Manaus; MAPA: Macapá)

Localizado na região dos limites interestaduais entre Minas Gerais (MG), Bahia (BA), Goiás (GO) e Distrito Federal (DF), o chamado bloco “Nortesul” (NS) foi, portanto, utilizado nos testes iniciais de integração de gravimetria à RAAP.

Os cálculos iniciais foram realizados em sistema de planilha eletrônica, com os dados referentes a um dos circuitos NS, apresentados na Figura 33 e nos Quadros respectivos (seções 3.1.5 e 3.2.3).

Foram calculadas as diferenças de número geopotencial (ΔC) para cada seção de nivelamento ao longo do circuito selecionado. A altitude aproximada da RN 1175-R (481,75 m) foi estabelecida como origem para o transporte das altitudes niveladas e dinâmicas. Exemplo: a seção 1175R-1175S tem $\Delta C = +183,58458 \text{ m}^2/\text{s}^2$, resultado do produto da diferença de nível bruta média (+18,76685 m, no Quadro 4) pelo valor médio ($9,78238655 \text{ m/s}^2$) da gravidade observada nessas RRNN (978240,38 e 978236,93 mGal, no Quadro 6). Tal valor de ΔC corresponde ao desnível dinâmico +18,7676 m, sendo $9,78200000 \text{ m/s}^2$ o valor de gravidade de referência. A altitude dinâmica da RN 1175S resulta, então, 500,5180 m.

Tal procedimento foi repetido sucessivamente para todas as seções do circuito. Os resultados são mostrados na Figura 54 e na Figura 55. A correlação das diferenças entre altitudes niveladas e dinâmicas com a variação do relevo mostra comportamentos distintos (Figura 54). Em alguns trechos da linha existe uma clara correlação inversa, como nos extremos (até 30 km e depois de 145 km). Já entre 60 e 130 km, o padrão de correlação inverte-se completamente.

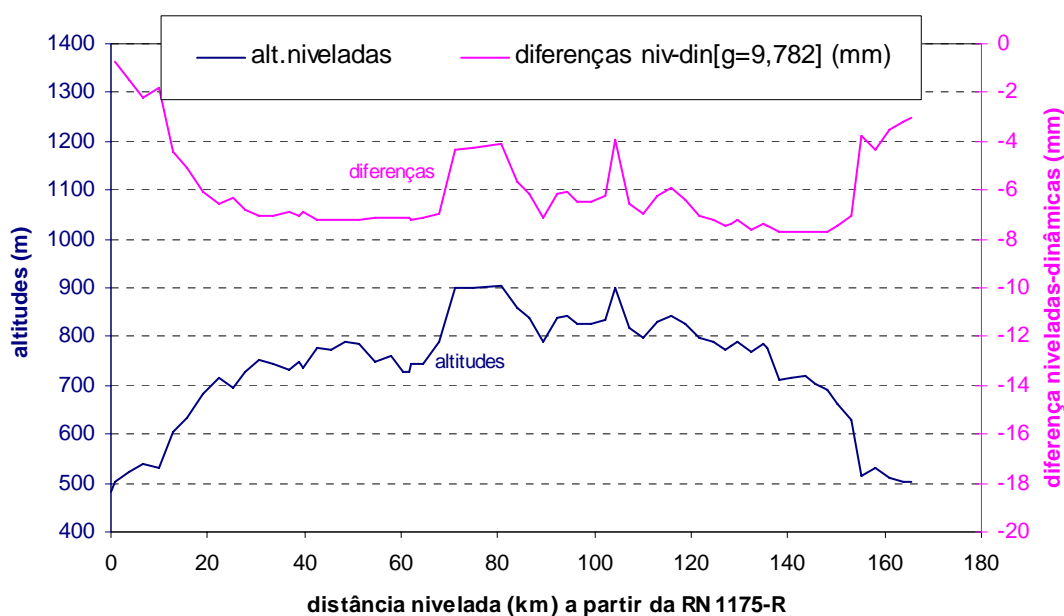


FIGURA 54 – DIFERENÇAS ENTRE ALTITUDES NIVELADAS E DINÂMICAS

A Figura 55 mostra a já citada suavidade das anomalias Bouguer em relação às anomalias ar-livre, que determina a preferência das primeiras no caso da interpolação de valores de gravidade.

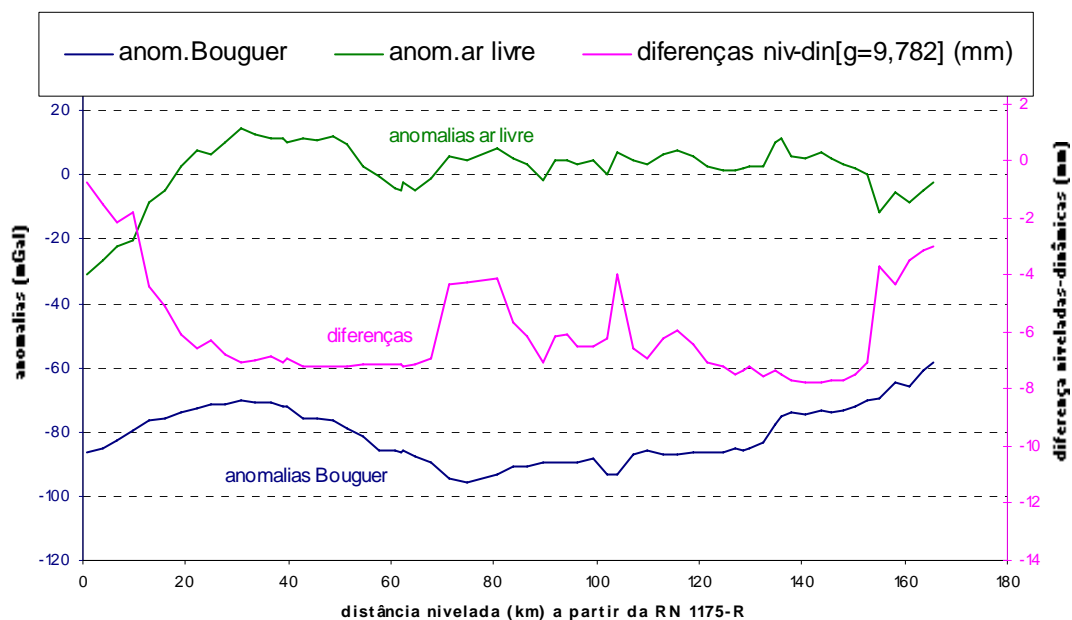


FIGURA 55 – ANOMALIAS DA GRAVIDADE E DIFERENÇAS ENTRE ALTITUDES

Os resultados desse cálculo preliminar serviram como padrão independente durante o desenvolvimento do sistema IDNOS.

Já nos seus processamentos iniciais, a inclusão da montagem da rede de nivelamento no IDNOS mostrou suas potencialidades, servindo para detectar e corrigir alguns problemas nos arquivos de nivelamento. Foram eliminadas 20 seções cujas repetições mostraram problemas. Nos processamentos iniciais também foi detectada a ausência de gravidade em 7 RRNN, as quais foram eliminadas do processamento através da fusão das seções envolvidas.

Com a eliminação das RRNN e seções suspeitas, definiu-se a rede utilizada nos testes subseqüentes, apresentada na Figura 56 e na Tabela 10. É composta por 861 RRNN, formando seis circuitos e totalizando aproximados 2.300 km de duplo nivelamento. Problemas nas coordenadas de quatro RRNN foram detectados e solucionados durante a montagem da rede, depois da análise dos valores da

correção normal-ortométrica. Contudo, observa-se que ainda existem problemas de coordenadas não corrigidos.

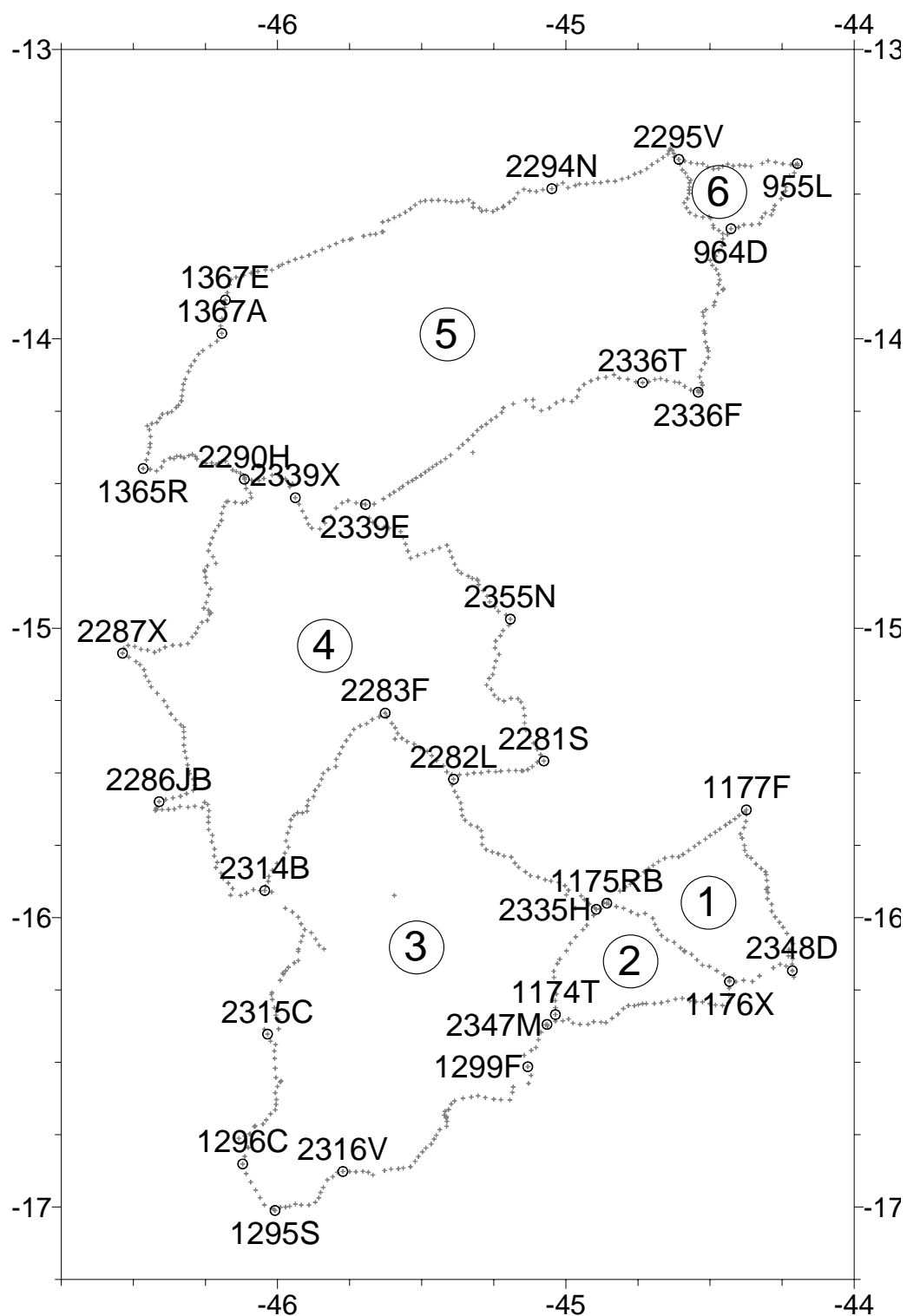


FIGURA 56 – REDE DE NIVELAMENTO E GRAVIMETRIA NA ÁREA DE TESTES

FONTE: Luz et al. (2006a)

TABELA 10 – ERROS DE FECHAMENTO DOS CIRCUITOS DA REDE SELECIONADA

| Circuito | perímetro (km) | Desníveis nivelados (m) | | Desníveis dinâmicos (m) | | Desníveis normais-ortométricos (m) | |
|----------|----------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | | Fechamen-to (mm) | Precisão (mm $\sqrt{dist_{km}}$) | Fechamen-to (mm) | Precisão (mm $\sqrt{dist_{km}}$) | Fechamen-to (mm) | Precisão (mm $\sqrt{dist_{km}}$) |
| 1 | 231,27 | +2,3 | 0,2 | +0,2 | 0,0 | -2,4 | 0,2 |
| 2 | 198,88 | -1,5 | 0,1 | -3,4 | 0,2 | -5,9 | 0,4 |
| 3 | 591,87 | -69,4 | 2,9 | -65,1 | 2,7 | -63,6 | 2,6 |
| 4 | 669,85 | -45,4 | 1,8 | -56,7 | 2,2 | -49,6 | 1,9 |
| 5 | 689,80 | +49,1 | 1,9 | +55,0 | 2,1 | +55,6 | 2,1 |
| 6 | 136,54 | -14,4 | 1,2 | -11,4 | 1,0 | -13,2 | 1,1 |

Um primeiro processamento dessa rede com IDNOS produziu os desníveis dinâmicos internodais, que foram ajustados considerando-se como referência a altitude aproximada da RN 2282-L (620,1 m). O Quadro 7 e a Tabela 11 mostram os resultados desse ajustamento – conforme discutido na seção 2.3.3.4 (p. 76), não se procedeu à análise estatística da discrepância exagerada entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$, que não afeta os resultados do ajustamento. Observa-se que os erros-padrão das linhas após o ajustamento atendem às prescrições para nivelamento “de alta precisão, fundamental” (erro padrão < 2 mm), conforme as especificações do IBGE (1983). A Figura 57 apresenta as isolinhas de precisão das altitudes ajustadas.

QUADRO 7 – RESUMO DO AJUSTAMENTO DOS DESNÍVEIS DINÂMICOS INTERNODAIS

| | | |
|---|----------|-----------------|
| - NUMERO DE OBSERVACOES (DESNIVEIS) | NEO = | 28 |
| - NUMERO DE PARAMETROS INCOGNITOS (ALTITUDES DESCONHECIDAS) | NPI = | 22 |
| - NUMERO DE PONTOS FIXOS DO AJUSTAMENTO (INJUNCOES) | NPF = | 1 |
| - NUMERO DE GRAUS DE LIBERDADE | NGL = | 6 |
| - INTERVALO DE CONFIANCA (REGIAO DE ACEITACAO) | RACE = | 0.950 |
| - SOMATORIO DOS QUADRADOS DOS RESIDUOS | VTPV = | 0.00001961 M2 |
| - VARIANCIA DA UNIDADE DE PESO A PRIORI | SIGPRI = | 1.00000000 M2 |
| - VARIANCIA DA UNIDADE DE PESO A POSTERIORI | SIGPOS = | 0.00000327 M2 |
| - MAIOR ERRO-PADRAO DOS DESNIVEIS AJUSTADOS (VALOR ABSOLUTO) | | 1.80 MM RAIZ KM |
| - MENOR ERRO-PADRAO DOS DESNIVEIS AJUSTADOS (VALOR ABSOLUTO) | | 1.32 MM RAIZ KM |
| - MAIOR RESIDUO (VALOR ABSOLUTO) | | 21.93 MM |
| - MENOR RESIDUO (VALOR ABSOLUTO) | | 0.36 MM |

NOTA: Relatório de ajustamento produzido pelo programa AJNIV

TABELA 11 – AJUSTAMENTO DOS DESNÍVEIS DINÂMICOS INTERNODAIS

| NUM | RN1 | RN2 | DESNÍVEL OBSERV. (M) | CORR. DINÂM. (MM) | PESOS | DIST. NIVELADA (KM) | DESNÍVEL AJUSTADO (M) | DESVIO PADRÃO (M) | RESID. (MM) | DESV. PADR. (MM) | ERRO PADRÃO MM.D**1/2 |
|-----|--------|--------|----------------------------|-------------------------|--------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|-----------------------------|
| 1 | 2281S | 2282L | 3.2308 | 0.23 | 0.0266 | 37.61 | 3.2350 | 0.0108 | 4.0 | 2.7 | 1.8 |
| 2 | 2282L | 2314B | -81.8142 | -3.93 | 0.0074 | 135.01 | -81.8224 | 0.0168 | -4.3 | 12.6 | 1.4 |
| 3 | 2314B | 1296C | 24.5974 | -2.82 | 0.0071 | 140.24 | 24.5751 | 0.0185 | -19.4 | 10.8 | 1.6 |
| 4 | 2314B | B2286J | 16.1026 | 0.68 | 0.0120 | 83.23 | 16.1122 | 0.0154 | 8.9 | 6.0 | 1.7 |
| 5 | B2286J | 2287X | 155.0346 | -0.70 | 0.0127 | 78.65 | 155.0423 | 0.0150 | 8.4 | 5.7 | 1.7 |
| 6 | 2287X | 2290H | 13.1045 | 0.74 | 0.0083 | 119.79 | 13.1180 | 0.0178 | 12.8 | 8.6 | 1.6 |
| 7 | 2290H | 1367A | 153.5607 | -12.50 | 0.0083 | 121.00 | 153.5401 | 0.0180 | -8.1 | 8.5 | 1.6 |
| 8 | 1367A | 1367E | 100.0191 | -11.04 | 0.0774 | 12.92 | 100.0072 | 0.0064 | -0.9 | 0.9 | 1.8 |
| 9 | 1367E | 2295V | -337.3250 | 29.64 | 0.0046 | 216.60 | -337.3098 | 0.0219 | -14.4 | 15.1 | 1.5 |
| 10 | 2295V | 955L | -202.5697 | 5.94 | 0.0200 | 50.00 | -202.5607 | 0.0101 | 3.0 | 7.8 | 1.4 |
| 11 | 955L | 964D | 34.8162 | -0.28 | 0.0244 | 41.06 | 34.8184 | 0.0096 | 2.5 | 6.4 | 1.5 |
| 12 | 2295V | 964D | -167.7392 | 2.65 | 0.0220 | 45.49 | -167.7423 | 0.0097 | -5.8 | 7.3 | 1.4 |
| 13 | 1296C | 1299F | -62.4431 | -4.13 | 0.0063 | 158.19 | -62.4692 | 0.0192 | -21.9 | 12.2 | 1.5 |
| 14 | 2282L | 2335H | -160.0672 | -9.75 | 0.0120 | 83.21 | -160.0654 | 0.0152 | 11.5 | 6.4 | 1.7 |
| 15 | 2335H | 1174T | 42.7378 | 3.29 | 0.0210 | 47.57 | 42.7451 | 0.0104 | 4.0 | 6.9 | 1.5 |
| 16 | 964D | 2336F | 98.2707 | -0.20 | 0.0132 | 75.64 | 98.2655 | 0.0148 | -5.0 | 5.3 | 1.7 |
| 17 | 2336F | 2339E | 297.5862 | -13.12 | 0.0063 | 158.44 | 297.5625 | 0.0199 | -10.5 | 11.1 | 1.6 |
| 18 | 2339E | 2290H | -144.3234 | 10.50 | 0.0167 | 59.71 | -144.3232 | 0.0128 | -10.3 | 5.7 | 1.7 |
| 19 | 2347M | 1299F | 33.2496 | 2.79 | 0.0482 | 20.74 | 33.2553 | 0.0081 | 2.9 | 1.6 | 1.8 |
| 20 | 2347M | 1174T | 35.6494 | 2.96 | 0.1445 | 6.92 | 35.6514 | 0.0047 | -1.0 | 0.5 | 1.8 |
| 21 | 2335H | B1175R | 21.5367 | 1.60 | 0.1520 | 6.58 | 21.5387 | 0.0046 | 0.4 | 0.9 | 1.8 |
| 22 | B1175R | 1176X | 263.1663 | 15.25 | 0.0161 | 62.30 | 263.1841 | 0.0105 | 2.5 | 9.6 | 1.3 |
| 23 | 1176X | 2348D | 42.3014 | 1.22 | 0.0368 | 27.21 | 42.3022 | 0.0088 | -0.4 | 3.4 | 1.7 |
| 24 | 2348D | 1177F | -286.4059 | -12.85 | 0.0132 | 75.95 | -286.4198 | 0.0126 | -1.1 | 9.4 | 1.4 |
| 25 | B1175R | 1177F | 19.0641 | 1.49 | 0.0152 | 65.81 | 19.0665 | 0.0122 | 0.9 | 8.2 | 1.5 |
| 26 | 2281S | 2355N | 175.8091 | 1.33 | 0.0137 | 72.85 | 175.8027 | 0.0145 | -7.8 | 5.2 | 1.7 |
| 27 | 2355N | 2339E | 74.2180 | -3.45 | 0.0120 | 83.00 | 74.2057 | 0.0154 | -8.9 | 6.0 | 1.7 |
| 28 | 1176X | 1174T | -241.9667 | -15.47 | 0.0121 | 82.42 | -241.9777 | 0.0120 | 4.5 | 11.2 | 1.3 |

NOTA: Relatório de ajustamento produzido pelo programa AJNIV. O erro padrão é a razão entre o resíduo e a raiz quadrada do comprimento da linha expresso em quilômetros.

Uma vez definida a rede e ajustadas suas altitudes dinâmicas, calcula-se as outras altitudes físicas, bem como as correções aos respectivos desníveis, mediante a reconstituição dos números geopotenciais correspondentes. É importante ressaltar que não apenas a correção dinâmica, mas também as demais (normal, normal-ortométrica e de Helmert), são calculadas sem a influência dos resíduos do ajustamento. A Figura 58 e a Figura 59 mostram exemplos referentes ao circuito 3.

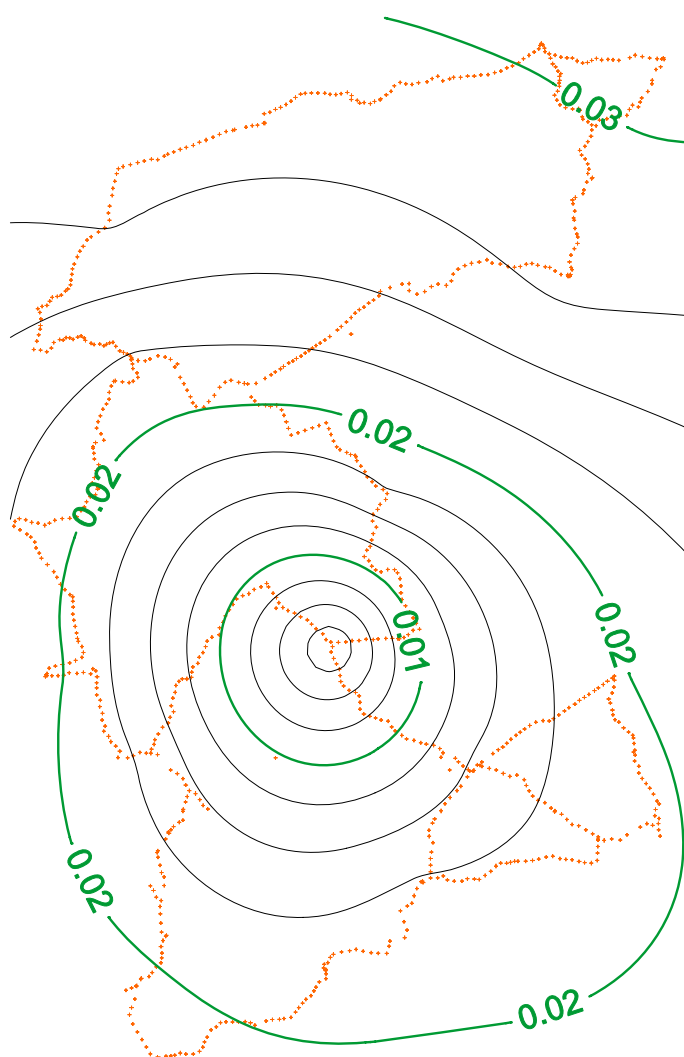


FIGURA 57 – DESVIOS-PADRÃO DAS ALTITUDES DINÂMICAS DA REDE DE TESTES

FONTE: Luz et al. (2006a)

NOTA: equidistância das isolinhas: 0,0025 m

Observa-se que a correção dinâmica apresenta uma clara correlação direta com o relevo. Esta situação inverte-se para a correção normal. A análise dos resultados referentes aos outros circuitos permitiu determinar que tal comportamento tem origem no valor da gravidade de referência utilizado para a obtenção dos desníveis dinâmicos. Para o circuito 3, uma grande parte dos valores de gravidade observada nas RRNN é maior que o valor da citada gravidade de referência. No caso do circuito 5, esta relação inverte-se e, conseqüentemente, o mesmo ocorre com o comportamento dos desníveis dinâmicos e normais.

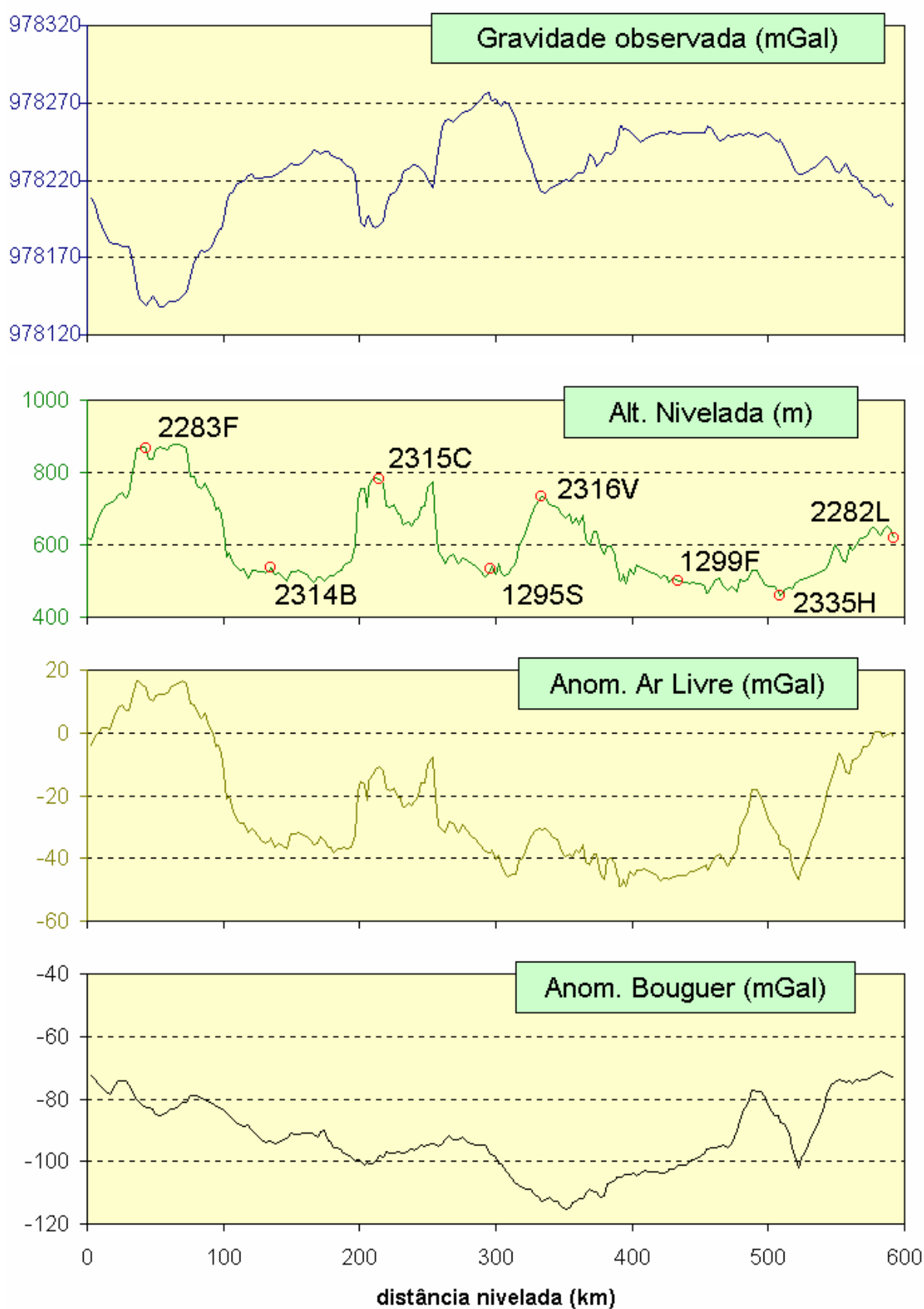


FIGURA 58 – GRAVIDADE OBSERVADA E RESPECTIVAS ANOMALIAS NO CIRCUITO 3
 FONTE: Luz et al. (2004)

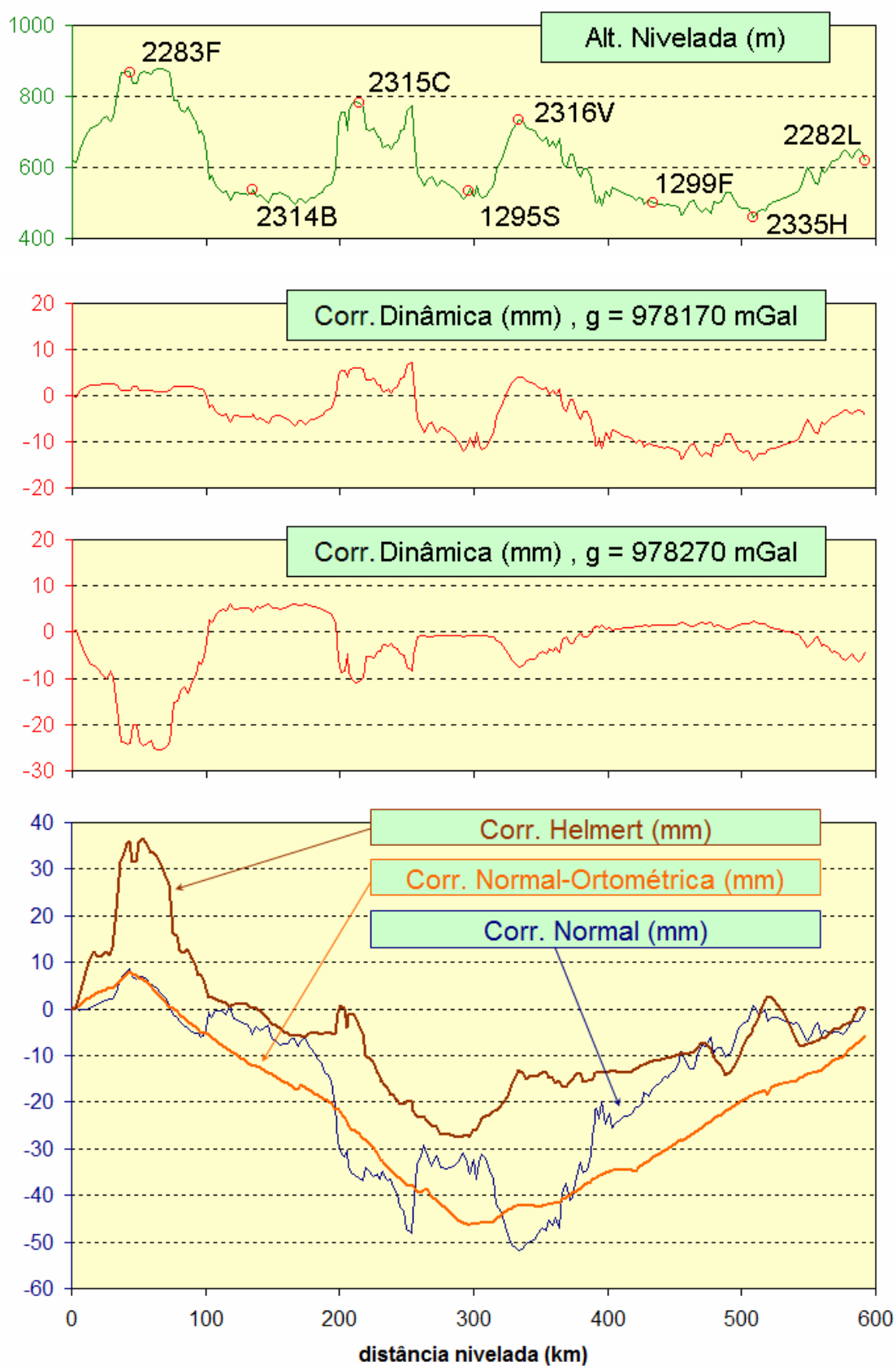


FIGURA 59 – CORREÇÕES PARA OS DESNÍVEIS OBSERVADOS NO CIRCUITO 3

FONTE: Luz et al. (2004)

4.4. INTERPOLAÇÃO DE GRAVIDADE

4.4.1 – Ferramentas computacionais utilizadas

Os testes aqui descritos utilizaram o programa PREDGRAV, projetado por Drewes (1978) e distribuído pelo GT-III/SIRGAS (SÁNCHEZ, 2005). Os pontos a interpolar devem ser informados ao programa com as respectivas coordenadas e altitudes. A interpolação é realizada com base em um conjunto de no mínimo 30 pontos mais próximos, dos quais se informam coordenadas, altitudes e valores de gravidade ou anomalia Bouguer. No caso destas últimas, devem referir-se ao GRS-80. O arquivo de saída informa, além dos dados de entrada, o valor interpolado de gravidade e a respectiva estimativa de desvio-padrão, conforme formulação apresentada na seção 2.2.5. Não se apresenta qualquer informação a respeito da função covariância adotada. Drewes (2008, comunicação pessoal) informou que se trata de uma função com distância de correlação variável – em função da distribuição dos pontos de referência – e mencionou um artifício para obtenção de seus parâmetros, o qual não foi bem-sucedido.

Não foi possível inspecionar o algoritmo desse programa, e tampouco implementar uma solução computacional específica no contexto desta Tese. Tais providências poderiam viabilizar uma análise mais detalhada dos resultados dos testes de interpolação, com ênfase na validação dos resultados em vista da distância de correlação (seção 2.2.5, p. 41).

Posteriormente, foram feitos testes preliminares com o programa GEOGRID, do pacote GRAVSOFT (FORSBERG, 2003), que forneceram resultados similares aos do PREDGRAV. Considerando que este programa é fornecido com código aberto, seria possível implementar soluções específicas, evitando, por exemplo, a necessidade de reformatação dos arquivos de dados e conversão das anomalias utilizadas nesta Tese – referidas ao GRS-67 –, e incluindo a mencionada qualificação do valor interpolado com base na distância de correlação. Entretanto, não foi possível desenvolver esta atividade.

4.4.2 – Resultados na área de testes (sub-rede NS)

A razão principal da procura por blocos homogêneos de linhas de nivelamento com informação gravimétrica foi a necessidade de verificar o desempenho da interpolação via colocação por mínimos quadrados nas condições mais comuns da RAAP – ou seja, a não existência de observação gravimétrica direta na maioria de suas RRNN, existindo, contudo, um número variável de EEGG esparsas no entorno das mesmas (Figura 36). Desde que suficientemente amplos, blocos com aquelas características permitiriam a comparação entre valores de gravidade observados e interpolados, simulando tais condições mais comuns. Assim, com os dados referentes à sub-rede NS, foi possível definir as estratégias para estas simulações.

Foram definidos três tipos de situação para interpolação de valores de gravidade ao longo das linhas de nivelamento representadas por círculos azuis, ilustrados na Figura 60:

- a) EEGG distribuídas de forma esparsa por toda a área de trabalho (codificadas com “1” e representadas com círculos vazados pretos), implicando em distâncias variáveis entre elas e cada ponto de interpolação. Tão ou mais importante que tal variação de distâncias é a variação das contribuições locais (solo, crosta, topografia etc), implícita na distribuição esparsa. Esta última característica resulta em uma melhor adequação dos parâmetros determinados para cada ponto, considerando uma certa promediação daquelas contribuições locais no respectivo entorno;
- b) EEGG concentradas nas imediações (“próximas”) dos pontos a interpolar. No caso da linha “4”, as EEGG próximas seriam as da linha “2”; e
- c) EEGG concentradas a uma distância relativamente grande (“afastadas”) dos pontos a interpolar. Tal seria o caso das EEGG da linha “3” em relação à RRNN da linha “4”.

Posteriormente, constatou-se que tais configurações não abrangem de forma completa o universo de possibilidades, já que as três situações descritas foram definidas apenas com EEGG coincidentes com RRNN, ou seja, com informação vertical confiável (*a priori*). Portanto, também seria importante analisar os

resultados da interpolação com base em informação gravimétrica não coincidente com RRNN, também disponível na sub-rede NS (Figura 52, p. 127).

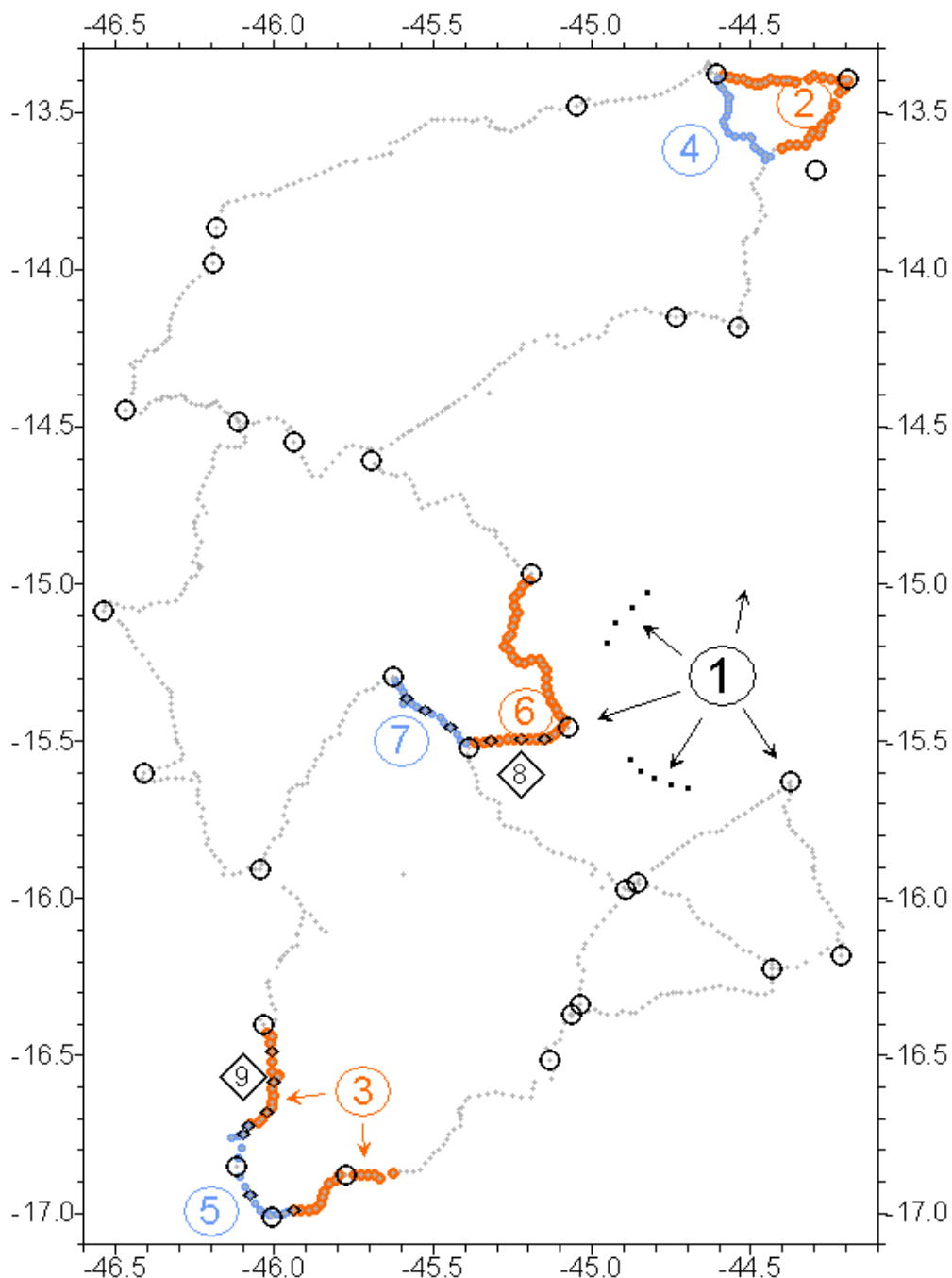


FIGURA 60 – CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA INTERPOLAÇÃO

FONTE: Luz et al., 2006b

A Figura 61 mostra os resultados para os exemplos apresentados na Figura 60. O uso de EEGG afastadas é claramente problemático – para o caso da

linha “4”, a diferença é de 51,4 mGal, com rms de 2,0 mGal. No entanto, os desvios-padrão estimados não são sensíveis a tais diferenças, apresentando um valor praticamente constante de 7 mGal. De acordo com a Tabela 4 (p. 44), e considerando uma altitude média de 500 m, os valores interpolados atenderiam às necessidades de cálculo de números geopotenciais – de forma totalmente incompatível com as diferenças mencionadas.

A interpolação baseada nas EEGG esparsas fornece resultados ligeiramente melhores que os referentes ao uso de EEGG próximas. Novamente os desvios-padrão são inconsistentes, indicando resultados piores.

Para todos os casos, foram considerados como referência para a interpolação tanto os próprios valores de gravidade observada, como os valores de anomalia Bouguer. Todos os resultados mostraram diferenças constantes entre um e outro caso, provavelmente em consequência da incompatibilidade do referencial (GRS-67) considerado nas anomalias fornecidas nos arquivos do IBGE.

Observa-se que, mesmo para o caso das estações esparsas, os desvios-padrão dos valores interpolados sofrem forte influência das estações mais próximas. A fim de avaliar a contribuição dessas estações, foram realizados novos testes, retirando-se aquelas estações mais próximas em cada caso. O resultados desses testes mostram acentuada degradação. Para a linha 4, por exemplo, a média das diferenças é de -24,9 mGal, rms 1,5 mGal (contra -5,0 mGal, rms 1,9 mGal do primeiro teste), com desvio-padrão praticamente constante de 12,3 mGal.

Em vista desses resultados, assume maior importância a busca de indicadores de qualidade alternativos. Além disso, é essencial que os procedimentos de interpolação sejam organizados de forma a permitir a exclusão de uma parte das EEGG de referência, que seriam utilizadas na avaliação dos resultados. Por fim, os resultados indicam ser essencial a existência de pontos de referência a pequena distância das estações para as quais se deseja interpolar valores de gravidade. Considerando a situação das informações gravimétricas brasileiras, discutida anteriormente (seção 3.2.2, p. 101), aquela restrição introduzirá significativas dificuldades para o atendimento às especificações de precisão da interpolação (Tabela 4, p. 44).

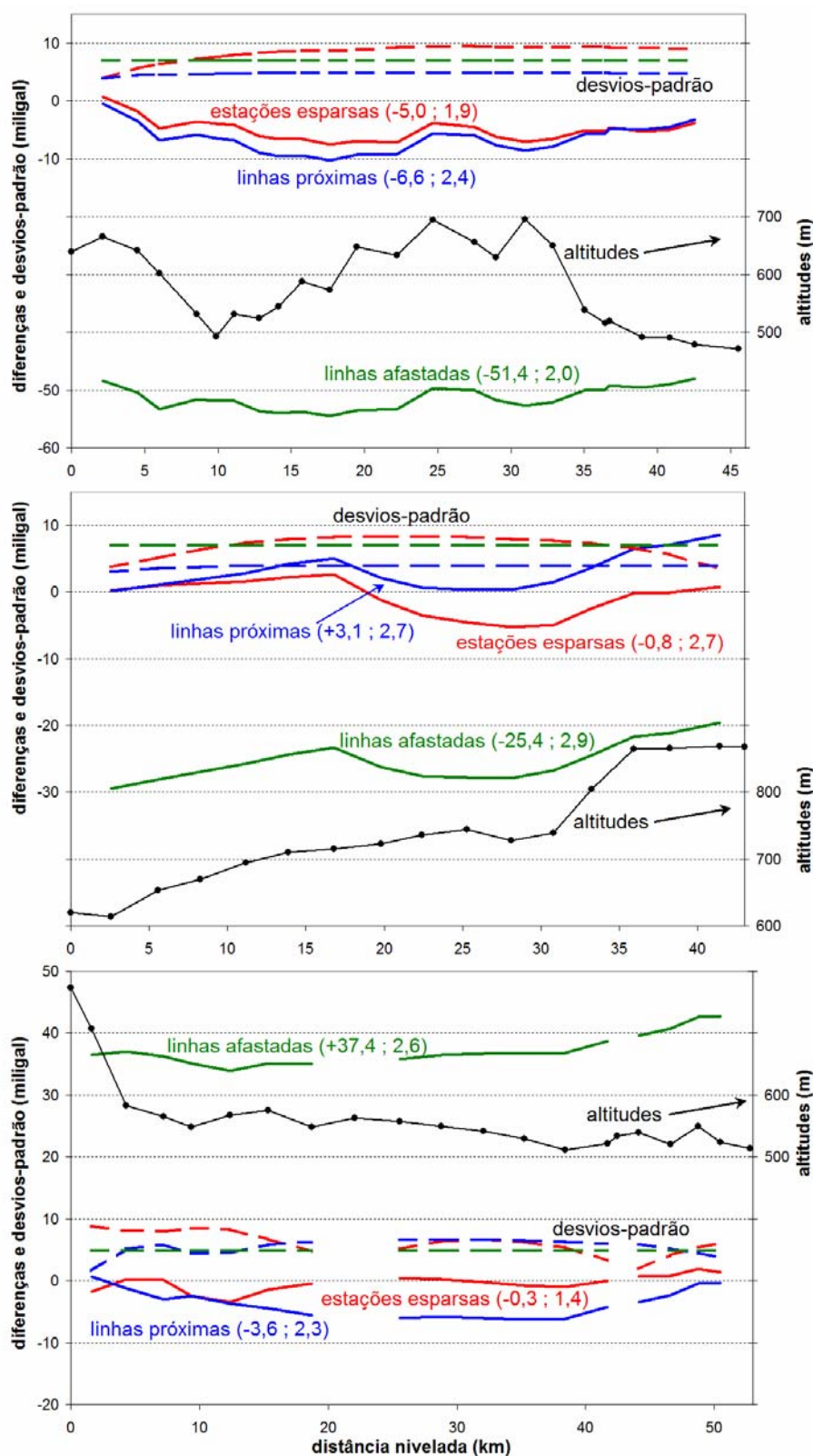


FIGURA 61 – DIFERENÇAS ENTRE GRAVIDADE OBSERVADA E INTERPOLADA

FONTE: Luz et al., 2006b

NOTA: (sup) linha 4 ; (centro) linha 7 ; (inf.) linha 5 – conforme Figura 60. Média e rms das diferenças são informados entre parênteses.

4.4.3 – Interpolação de gravidade para toda a RAAP

Posteriormente, foi iniciada a preparação de testes de interpolação com todas as EEGG do IBGE coincidentes com as RRNN da RAAP – EEGG(IBGE)xRRNN. No entanto, o grande volume de dados acarretou uma longa etapa de depuração, que impediu a realização desses testes. Com o objetivo exclusivo de verificar o desempenho do PREDGRAV, foi feita a interpolação de gravidade para todas as RRNN da RAAP que não dispõem de gravidade, com base nas informações, parcialmente criticadas, daquelas EEGG(IBGE)xRRNN. A Figura 62 apresenta os desvios-padrão desses valores interpolados. Nesta Figura é possível observar a distribuição extremamente desfavorável de EEGG(IBGE)xRRNN nas Regiões Sul e Nordeste.

Pelo mesmo motivo, também não se utilizaram os dados da SCGGSA, recebidos em seguida. Apesar disso, foi possível chegar a algumas conclusões preliminares. A principal delas refere-se à já mencionada composição dessa base de dados, que não inclui identificação das RRNN ocupadas nos levantamentos gravimétricos de outras instituições. Apesar da existência de coordenadas e altitudes possivelmente referidas a diferentes *data* (e. g., LOBIANCO et al., 2005), decidiu-se iniciar uma análise de proximidade com os dados, identificando-se algumas possibilidades de coincidência. No entanto, tal análise não pôde ser concluída. Paralelamente, decidiu-se buscar as informações originais em algumas das instituições identificadas, a fim de suprir a necessidade de informação gravimétrica na sub-rede da RAAP selecionada para a conexão terrestre das estações maregráficas de Salvador, Macaé e Imbituba. O objetivo de preencher estes vazios gravimétricos não pôde ser alcançado, mas a montagem da sub-rede “Imbi-Maca-Salv” prosseguiu. Os resultados são apresentados no Capítulo 6.

Um aspecto importante para a continuação dos estudos sobre interpolação de valores de gravidade, em uma região extensa como a abrangida pela RAAP, diz respeito à variabilidade das condições geológicas. Um exemplo de alternativa para o agrupamento das EEGG de referência é dado na Figura 63, que apresenta as províncias estruturais brasileiras. Observa-se que a sub-rede NS está inteiramente situada em apenas uma dessas unidades geológicas – a Província São Francisco. Tal situação poderia, eventualmente, contribuir para uma certa homogeneidade dos

dados submetidos à montagem da função covariância para interpolação de gravidade. Assim, é conveniente que futuros testes contemplem também o aspecto geológico do problema.

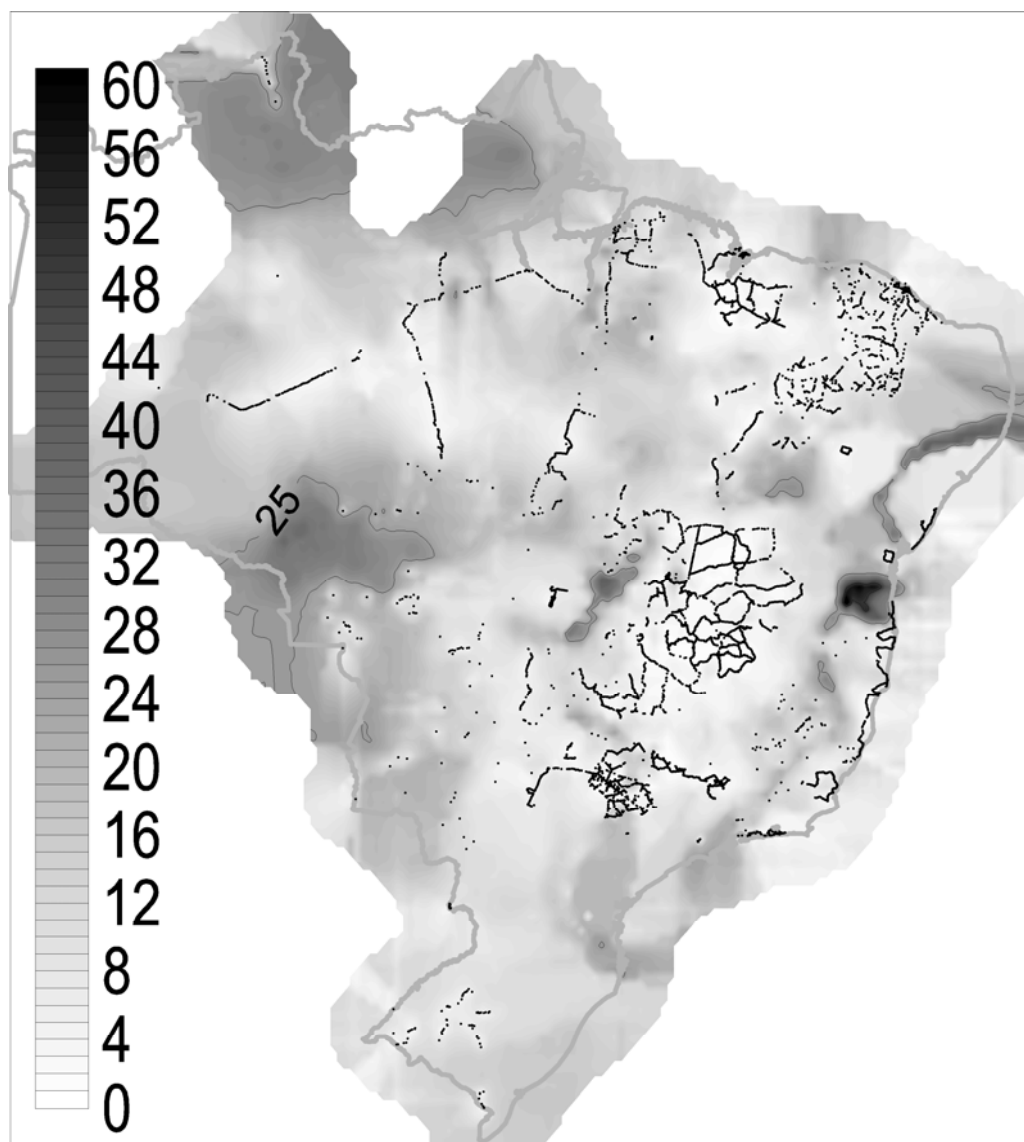


FIGURA 62 – DESVIOS-PADRÃO NOMINAIS (MGAL) DA INTERPOLAÇÃO DE GRAVIDADE NA RAAP

FONTE: Luz et al., 2006b

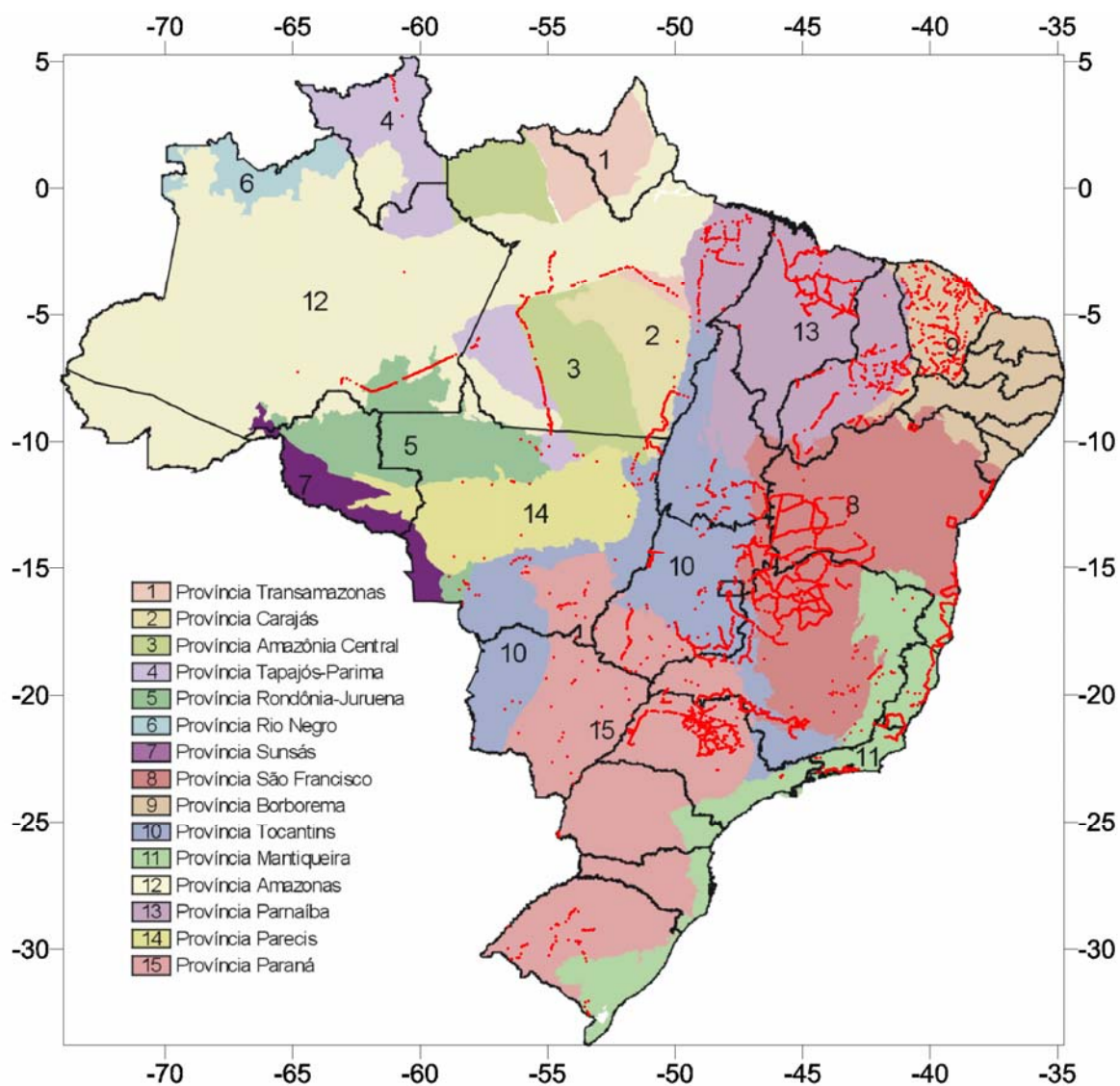


FIGURA 63 – DISTRIBUIÇÃO DAS EEGG(IBGE)XRRNN EM RELAÇÃO ÀS PROVÍNCIAS ESTRUTURAIS BRASILEIRAS

FONTE: adaptado de Bizzi et al., 2003, p. xiii

5. PREPARAÇÃO PARA INTEGRAÇÃO DE ALTSAT À RAAP

5.1. ESTRATÉGIA PARA PROPAGAÇÃO DA TNMM ATÉ A COSTA

Em geral, a integração de informações de ALTSAT e marégrafos exige a utilização de métodos de interpolação, em função da localização desfavorável destes últimos em relação às trilhas dos satélites altimétricos. Este não é o caso dos estudos desenvolvidos nesta Tese, como se observa na Figura 64. Tal situação permitiu fazer uso direto dos perfis de SSH ao longo das trilhas, a fim de propagar as estimativas de TNMM obtidas com maior precisão nas áreas mais afastadas da costa. De forma a assegurar a compatibilização dos níveis de referência desses perfis, foram selecionadas trilhas “transversais” situadas inteiramente em águas profundas, igualmente afastadas da costa. A configuração inicial dessas trilhas de referência, posteriormente densificada, também é mostrada na Figura 64. Observa-se que, tanto para as trilhas dos marégrafos quanto para as de referência, foram escolhidos pares de trilhas (Jason-1, T/P-EM), como forma de evidenciar eventuais efeitos sistemáticos nos cruzamentos de trilhas de uma mesma missão e nos cruzamentos inter-missões.

A inclusão da batimetria nessa Figura permite apreciar outro aspecto importante no contexto desta Tese – a pequena largura da plataforma continental na região da estação de Salvador. Juntamente com a virtual ausência de perturbações do NMM de origem meteorológica nessa estação (Figura 40), aquela característica levou à decisão de fazer de Salvador uma área de testes de integração de dados da RMPG e de ALTSAT. Tal decisão foi responsável pela extensão dos testes de integração de gravidade ao nivelamento, relatados anteriormente, na tentativa de incluir Salvador.

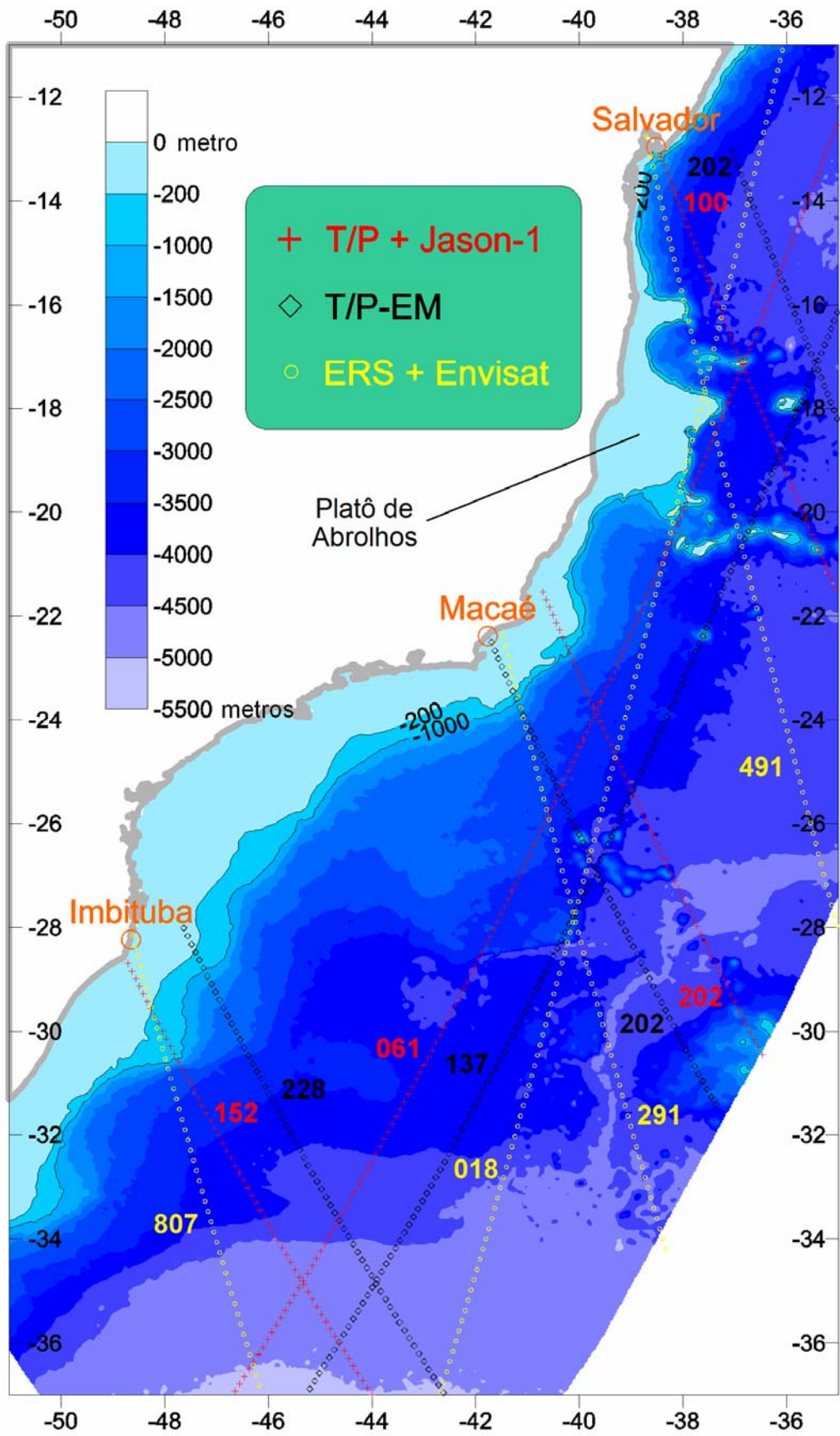


FIGURA 64 – PASSAGENS SELECIONADAS PARA A INTEGRAÇÃO COM A RMPG
 FONTE: adaptado de Luz et al. (2007a)

5.2. BASES DE DADOS DO DGFI

5.2.1 – Reorganização por células (bins)

As informações de ALTSAT consideradas nesta Tese foram cedidas pelo Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas (DGFI). Sua base de dados, denominada BINs, é montada a partir dos dados (GDRs, MGDRs) distribuídos pelos respectivos centros de dados (DGFI, 2007), mas segue uma estrutura diferente. As observações são agrupadas em “células” (*bins*) definidas ao longo das trilhas nominais (Figura 65), para as quais são determinados os gradientes, longitudinal e transversal, do modelo de SMM. Tais gradientes permitem a redução dos valores de SLA para o centro de cada célula (SLACOB, de *center of bin*), e a conseqüente montagem de séries temporais dessas informações (SAVCENKO, BOSCH, 2006). Estes conceitos são ilustrados, respectivamente, na Figura 66 e seguintes.

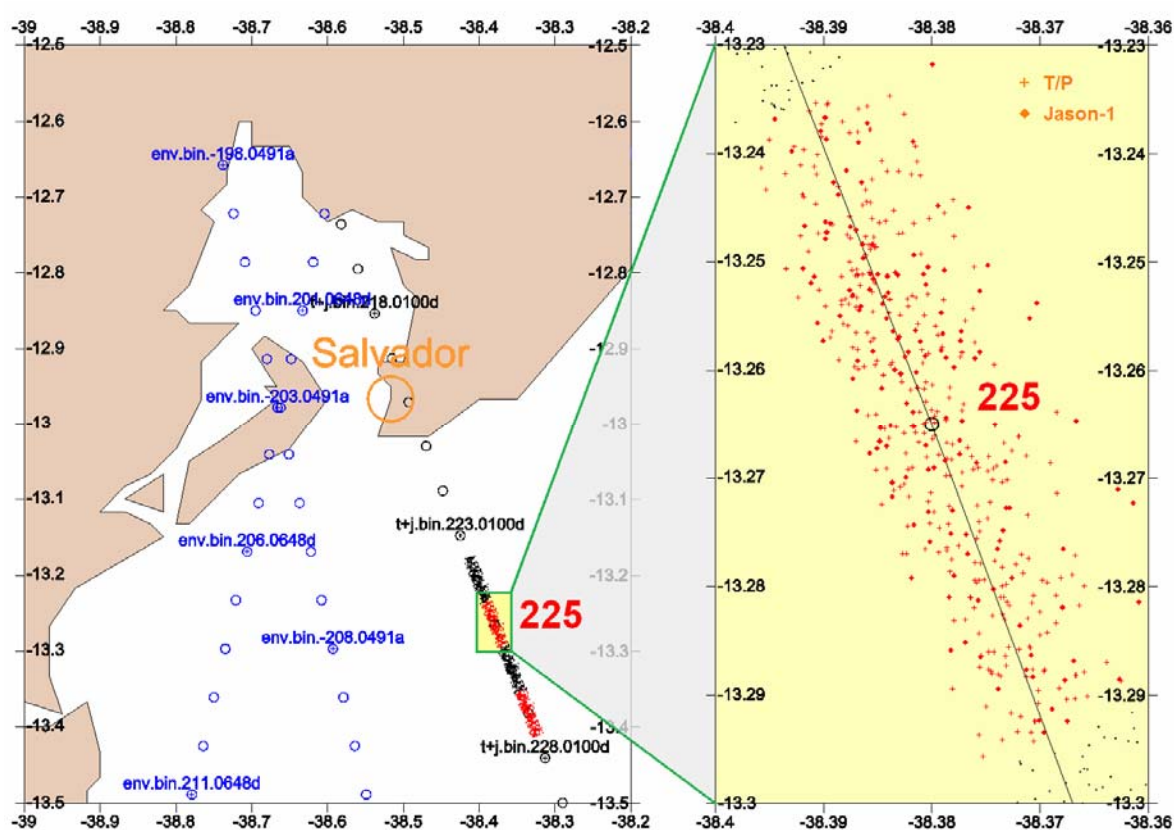


FIGURA 65 – ORGANIZAÇÃO DE DADOS DE ALTSAT SEGUNDO A ESTRUTURA DE *BINS*

NOTA: Dados no entorno de Salvador: (esq.) os círculos em azul e preto representam os centros dos *bins* de ERS e Envisat e de T/P e Jason-1, enquanto que as nuvens de pontos em preto e vermelho representam as observações individuais nos *bins* 224 a 227 da trilha 100d de T/P e Jason-1; (dir.) detalhe das observações no *bin* 225

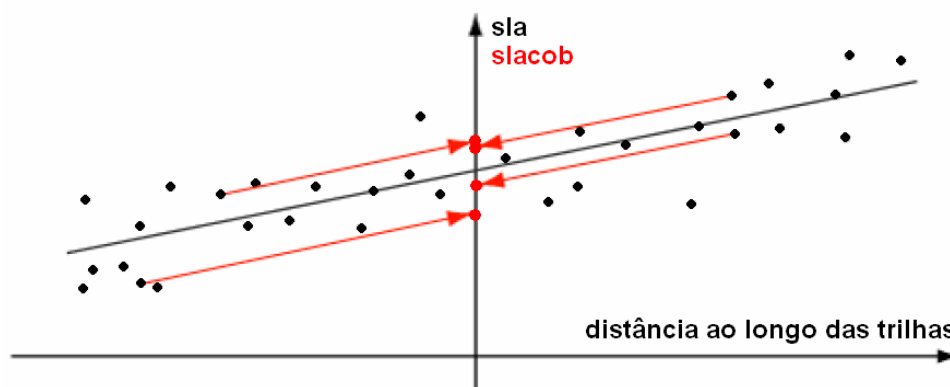


FIGURA 66 – REDUÇÃO DAS ANOMALIAS DE NÍVEL DO MAR AO CENTRO DOS *BINS*

FONTE: Savcenko, Bosch, 2006

Os valores de SLACOB para os *bins* 221 a 224 (Figura 65) são inicialmente mostrados na Figura 67. Observa-se que os eixos das ordenadas têm limites exagerados (até ± 35 m), a fim de acomodar a grande variabilidade dos valores referentes aos *bins* mais próximos à linha de costa – notadamente o 221. Tal característica é proposital, e tem o objetivo de ilustrar a degradação das informações de ALTSAT próximas à linha de costa. Uma escala vertical mais adequada (até $\pm 1,5$ m) é utilizada na Figura 68, que permite observar a diminuição da variabilidade de SLACOB à medida que aumenta a distância à costa. Essa Figura também permite observar um exemplo de outra importante característica das informações de ALTSAT próximas à costa: o brusco gradiente da TNMM, aqui representado pela diferença entre os valores médios de SLACOB nos *bins* 223 (desvio de aproximadamente 200 mm) e 224 (praticamente nulo).

Surpreendentemente, a correção da troposfera úmida (WTROP), mostrada na Figura 69, não demonstra reflexos da proximidade da linha de costa – ao contrário do que se afirmou na seção 2.3.2.2 (p. 66). Posteriormente a esta análise inicial dos dados do DGFI, foi gerada uma nova versão dos dados de ALTSAT (BOSCH, SAVCENKO, 2006), com uma versão aprimorada de WTROP. A solução de TNMM discutida na próxima seção foi gerada com esses novos dados de ALTSAT.

A variabilidade mostrada na Figura 68 pode ser melhor avaliada na Figura 70, que apresenta os desvios-padrão da medida altimétrica (STDALT) para os mesmos *bins* das Figuras anteriores. Nesta Figura 70, constata-se a melhor

qualidade (menor variabilidade) dos dados do satélite T/P, na sua configuração orbital original (1992-2002), em relação aos dados do satélite Jason-1 (2002-2005), que assumiu as mesmas trilhas do T/P.

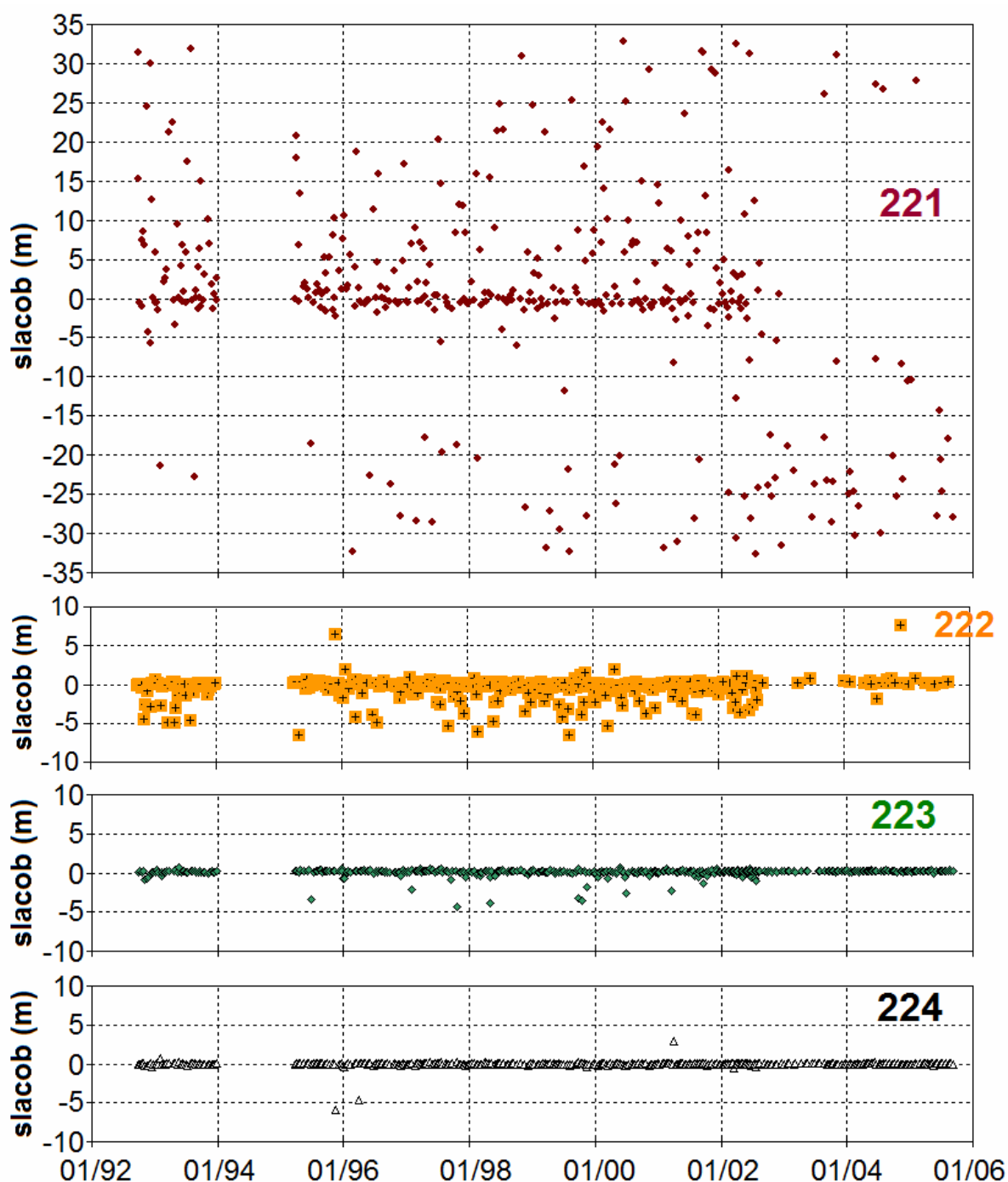


FIGURA 67 – EXEMPLOS DE DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA INFORMAÇÃO DE ALTSAT EM FUNÇÃO DA PROXIMIDADE DA LINHA COSTA

NOTA: a escala vertical intencionalmente exagerada (+/-35 m) mostra a pronunciada variabilidade dos dados (SLACOB, anomalias do nível do mar reduzidas ao centro do *bin*) nos *bins* mais próximos à linha de costa. Gráficos com escala vertical mais adequada são mostrados na Figura 68. A localização dos *bins* a que se referem os gráficos é mostrada na Figura 65.

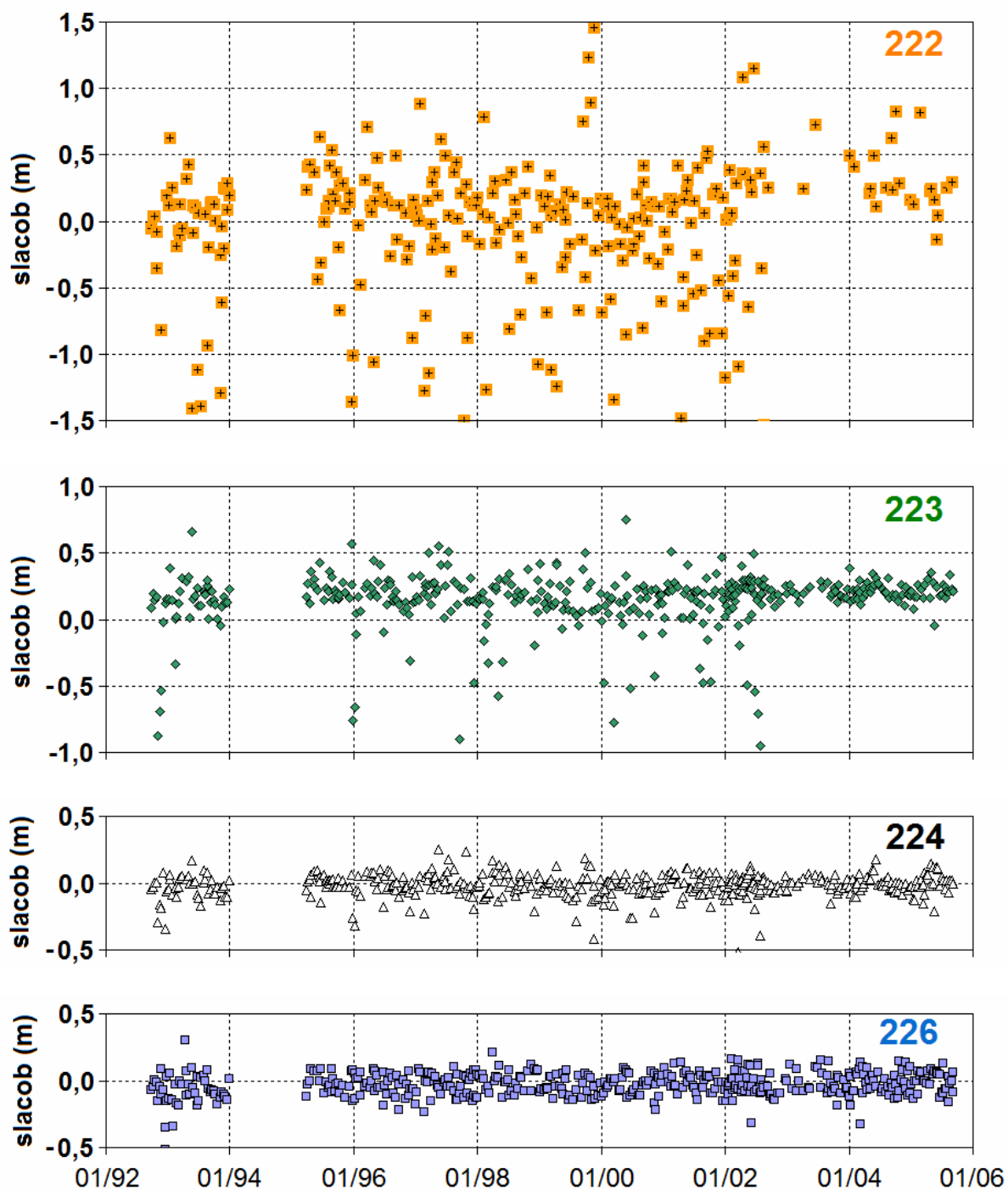


FIGURA 68 – EXEMPLOS DA MELHORIA DA QUALIDADE DOS DADOS DE ALTSAT COM O AUMENTO DA DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA

NOTA: ampliação dos gráficos de SLACOB (anomalias do nível do mar reduzidas ao centro do *bin*) mostrados na Figura 67. Observa-se que já no *bin* 224 a variabilidade de SLACOB parece mostrar-se “estabilizada”. A localização dos *bins* a que se referem os gráficos é mostrada na Figura 65.

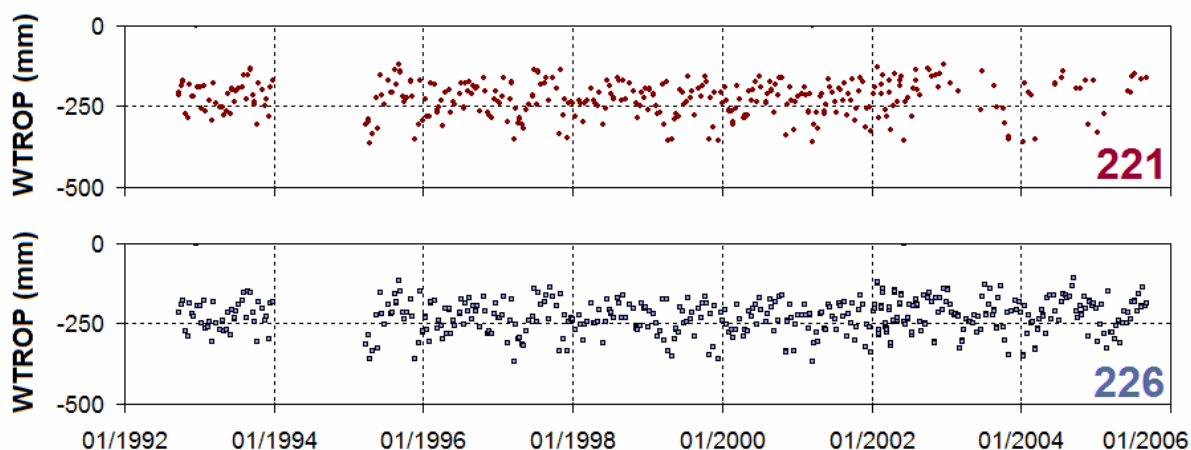


FIGURA 69 – EXEMPLOS DE CORREÇÃO DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA ÚMIDA

NOTA: não se observam diferenças significativas entre as correções nos *bins* 221 e 226, à exceção da maior taxa de rejeição dos dados do Jason-1 no *bin* 221, fato implícito na rarefação do respectivo gráfico (2002-2005). A localização dos *bins* a que se referem os gráficos é mostrada na Figura 65.

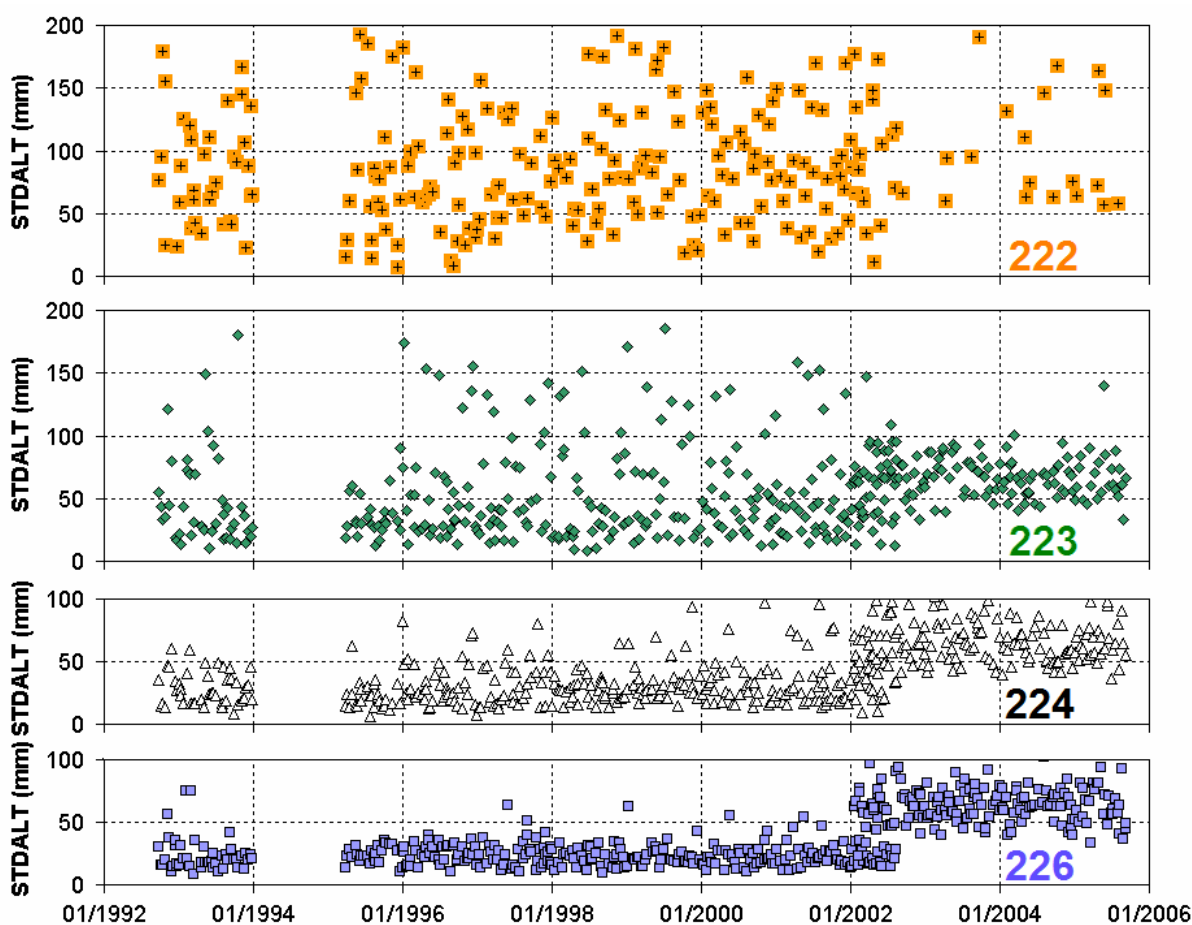


FIGURA 70 – EXEMPLOS DE DESVIO-PADRÃO DA MEDIDA ALTIMÉTRICA

NOTA: é nítida a maior variabilidade nos *bins* mais próximos à linha de costa e, de forma geral, dos dados do Jason-1 (2002-2005). A localização dos *bins* a que se referem os gráficos é mostrada na Figura 65.

Nas Figuras anteriores, a falta de informações referentes ao ano de 1995 está relacionada ao processo de compatibilização dos dados das diferentes missões altimétricas incluídas na base de dados do DGFI (BOSCH, SAVCENKO, 2006) – esse foi o único período em que não havia disponibilidade de dados de outra missão, além de T/P (Figura 71), para cálculo da correção radial r_{cruz} (p. 68).

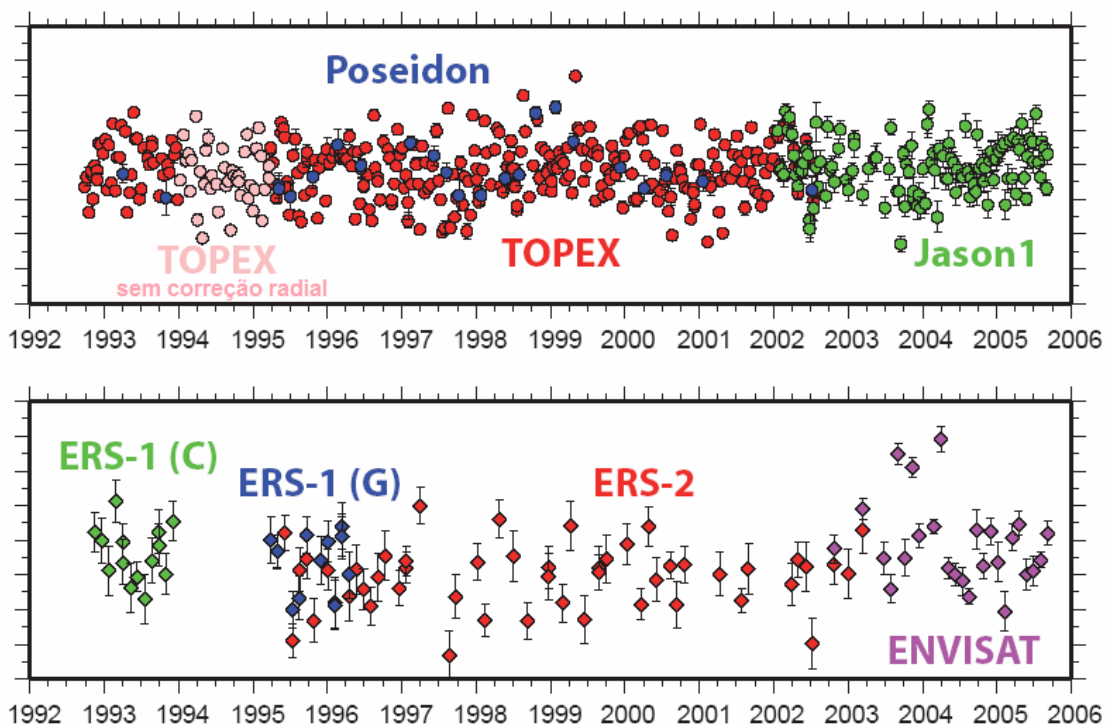


FIGURA 71 – DIFERENTES CONJUNTOS DE DADOS CONSIDERADOS NA COMPOSIÇÃO DA BASE DE DADOS DE ALTSAT INTERCALIBRADOS DO DGFI

FONTE: Bosch, Savcenko (2006)

Os estudos descritos a seguir fazem uso das informações de SLACOB e SMM apenas para reconstituir a altura do nível do mar (SSH), não incluída nos arquivos de dados de ALTSAT do DGFI. A Figura 72 apresenta exemplos de SMM para as trilhas de referência (061a de T/J+Jason-1, e 137a de T/P-EM) e de conexão das estações da RMPG (152d e 100d de T/J+Jason-1, e 202d de T/P-EM) mostradas na Figura 64. A Figura 73 mostra exemplos de SLACOB, para a trilha de referência 061a. Os efeitos da topografia submarina são evidentes, entre as latitudes 17° S e 21° S. Além dessas feições explícitas, a pequena profundidade também tem efeitos mais sutis nessas trilhas, como se relata na próxima seção.

Na Figura 73 também são observados os “ruídos de alta freqüência”, cuja filtragem é essencial para a extração de estimativas de TNMM adequadas, em função da diferença de resolução entre os dados de ALTSAT e os modelos do geopotencial disponíveis.

Duas abordagens foram adotadas para a obtenção da TNMM. A primeira delas consistiu na aplicação de filtros passa-baixa limitados à vizinhanças de cada ponto de observação. Inicialmente foi implementada uma filtragem baseada na mediana, segundo janelas móveis de 5 pontos, equivalentes a aproximados 30 km. Tal pequena restrição espacial visa preservar possíveis feições da TNMM que eventualmente estejam representadas no futuro EGM2008, de grau 2160.

O desenvolvimento dessa estratégia foi interrompido em favor de outra abordagem, de aplicação mais imediata, apresentada a seguir.

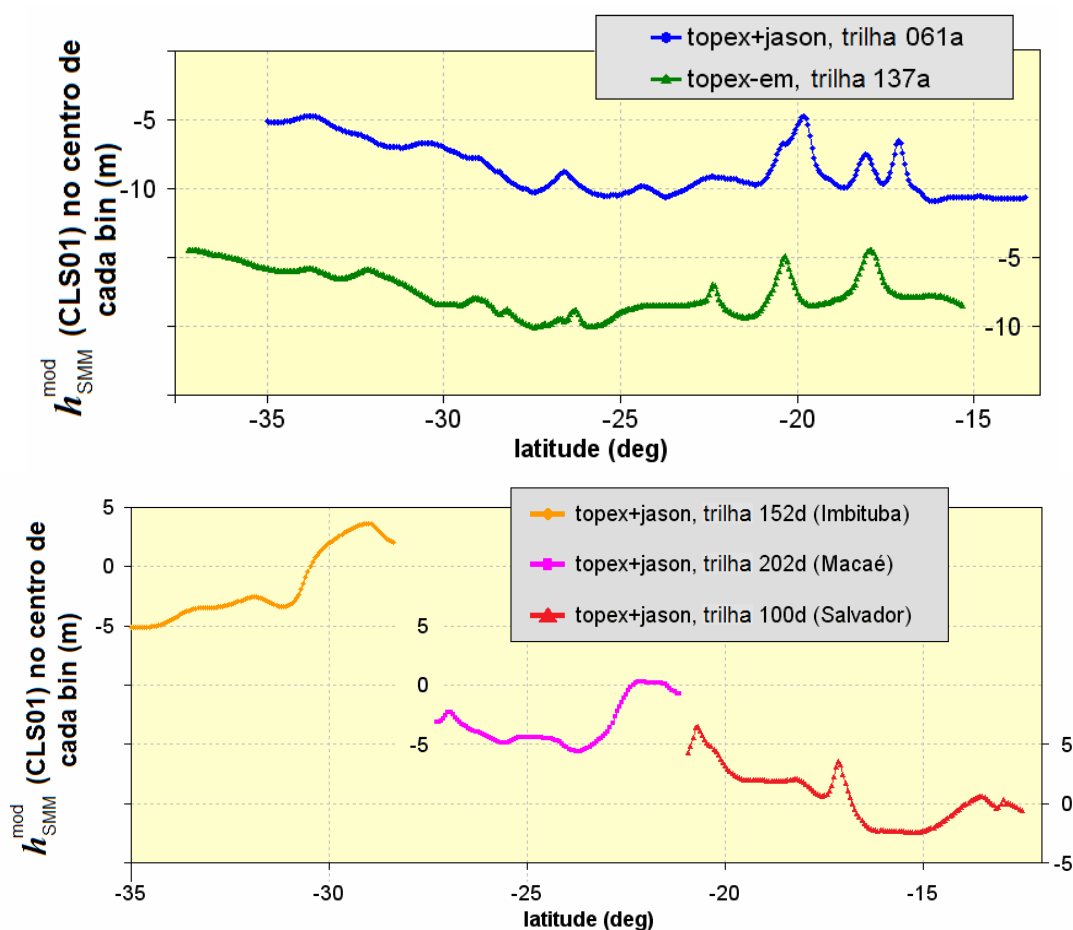


FIGURA 72 – VALORES DE SMM AO LONGO DAS TRILHAS DA CONFIGURAÇÃO INICIAL

NOTA: valores (em metros) oriundos do modelo CLS01: (sup.) variação da SMM ao longo das duas trilhas de referência preliminares; e (inf.) SMM ao longo das trilhas conectoras dos marégrafos

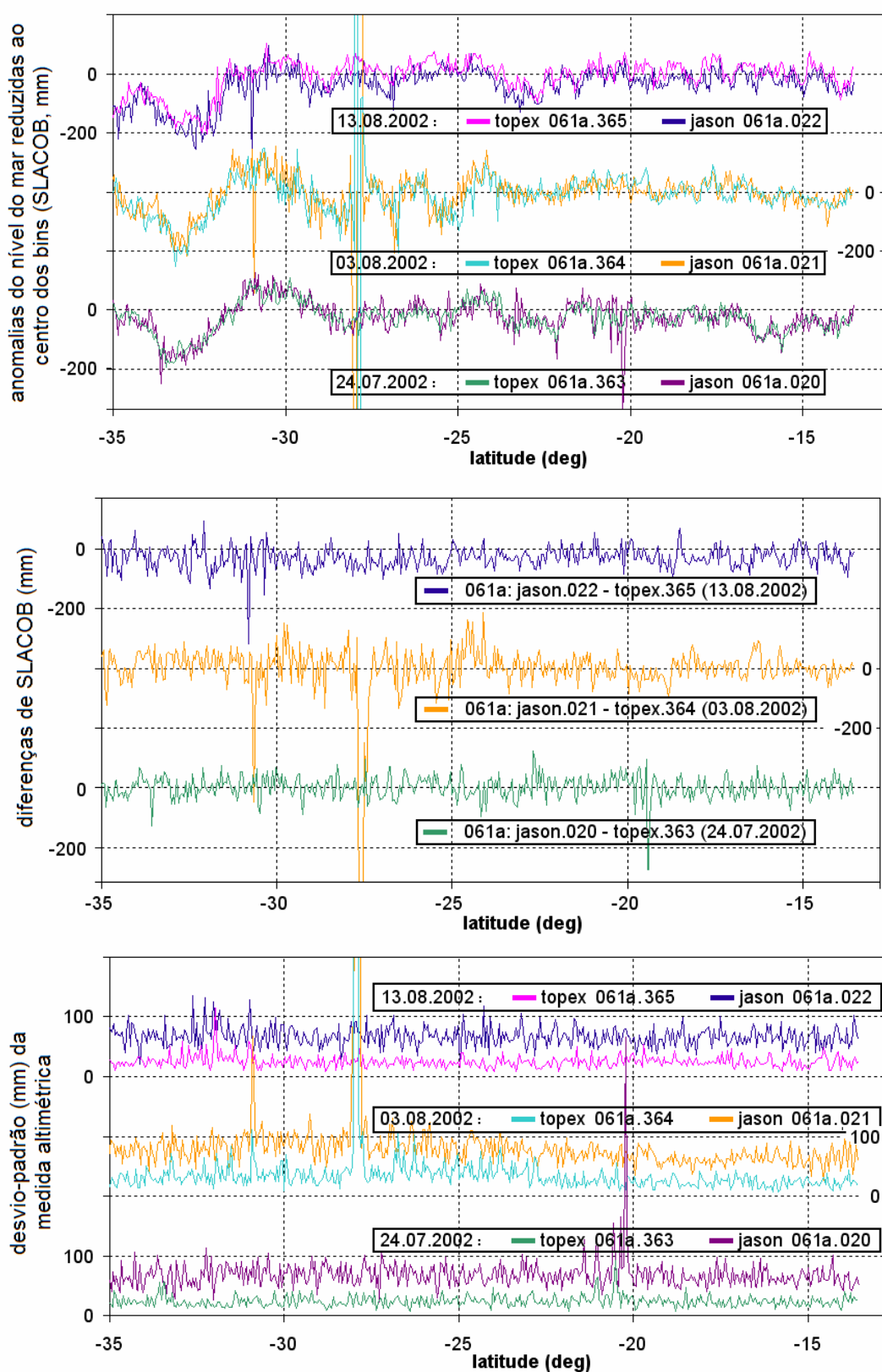


FIGURA 73 – DADOS DE ALTSAT AO LONGO DAS TRILHAS DE REFERÊNCIA NO PERÍODO DE COLETA CONJUNTA DE T/P E JASON-1

NOTA: dados referentes a três ciclos do período em que T/P e Jason-1 seguiram a mesma órbita: SLACOB de ambos (sup.); diferenças de SLACOB (centr.); e desvio-padrão instrumental, STDALT (inf.), observando-se a maior variabilidade dos dados de Jason-1, também mostrada na Figura 70

5.2.2 – TNMM

Bosch e Savcenko (2007) propuseram uma filtragem de maior abrangência espacial (250 km), a fim de contornar uma das deficiências do modelo EIGEN-GL04C – as chamadas assinaturas orbitais. Para tanto, utilizaram um filtro espectral uni-dimensional, adequado para o problema específico dos perfis altimétricos. O filtro assim caracterizado foi aplicado às SSH ao longo dos perfis altimétricos e aos perfis do geopotencial extraídos do EIGEN-GL04C para os mesmos pontos de SSH. Dessa forma, aqueles autores estimaram a TNMM em cada ponto altimétrico através da diferença entre SSH e altura geoidal:

$$TNMM = SSH - N \quad (86)$$

aplicando esse procedimento aos dados das missões T/P-EM e Jason-1, no período após o remanejamento do satélite T/P para as trilhas intermediárias às trilhas do Jason-1. No contexto desta Tese, a base de dados construída por aqueles autores foi aplicada ao problema da propagação da TNMM das trilhas de referência até as estações da RMPG, apresentado anteriormente. Nessa aplicação, assume particular importância a estratégia utilizada por aqueles autores para “preencher” a lacuna de SSH nas porções terrestres das trilhas, para os pontos de observação próximos à costa, por intermédio de um ajustamento polinomial iterativo dos perfis de SSH. A adequação desse procedimento é discutida posteriormente – por hora, cumpre apenas mencionar sua correlação com uma das anomalias apontadas nas figuras descritas a seguir.

A Figura 74 mostra a variação temporal dos perfis da TNMM ao longo das trilhas de referência preliminares, e a Figura 75, ao longo das trilhas conectoras dos marégrafos. A grande amplitude, provavelmente reflexo da variabilidade sazonal da TNMM, foi intencionalmente mantida nos gráficos, a fim de permitir a apreciação geral do fenômeno.

A crescente variabilidade da TNMM ao sul da latitude 30° S, comum às duas trilhas de referência, é interpretada como reflexo da área central da Corrente do Brasil, interceptada por ambas as trilhas. Entretanto, entre 25° S e 15° S, as trilhas paralelas mostram um comportamento totalmente oposto – a trilha 061 de Jason-1

tem um mínimo de 0,50 m ~ 0,65 m em torno de 19° S/20° S, onde a trilha 137 de T/P-EM apresenta um máximo de 0,90 m ~ 1,05 m. Uma eventual causa dessa inconsistência poderia ser a cadeia submarina existente entre 19° S e 21° S (Figura 64, p. 146).

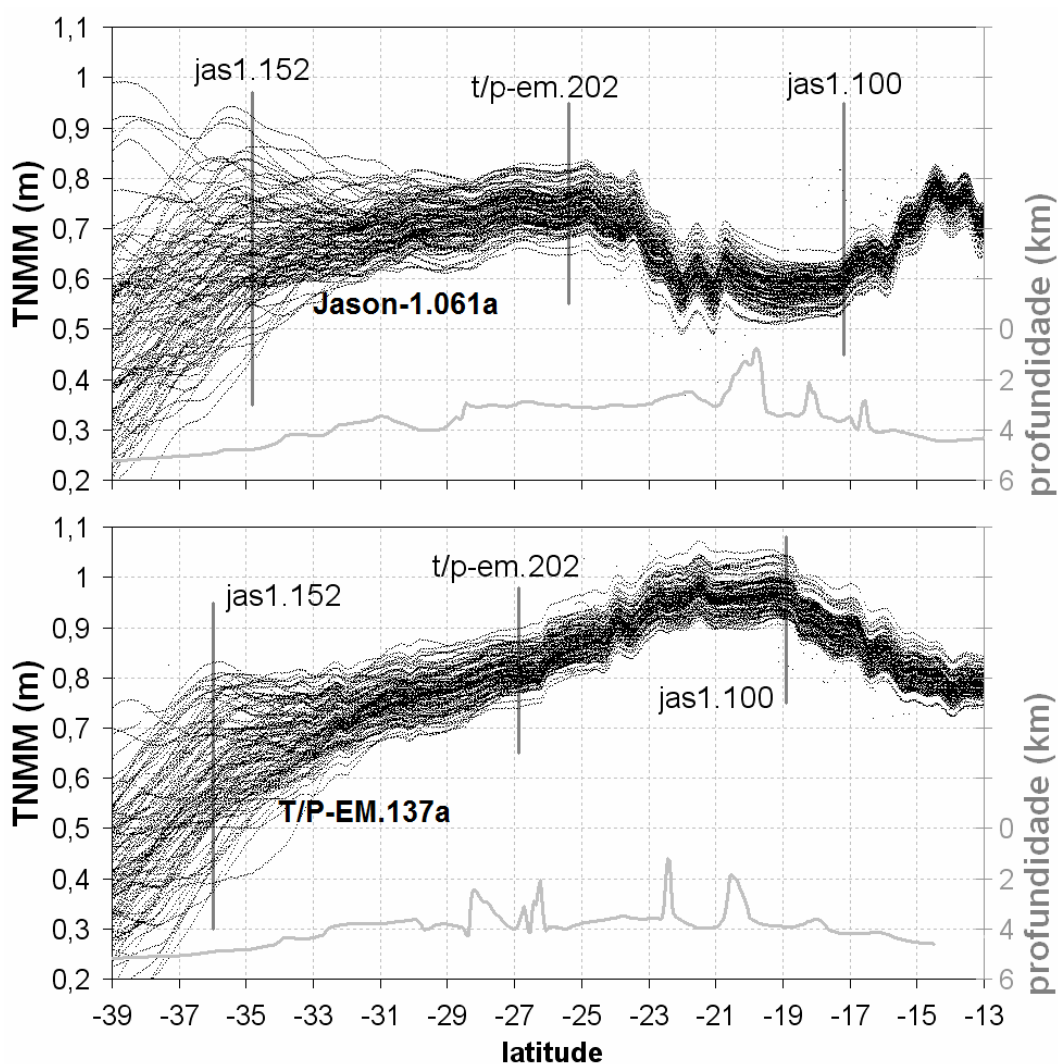


FIGURA 74 – PERFIS DE TNMM NAS TRILHAS DE REFERÊNCIA

FONTE: Luz et al., 2007c

NOTA: Profundidades (linhas cinza, eixo direito) e estimativas de TNMM (pontilhados pretos, eixo esquerdo) para as trilhas de referência preliminares – Jason-1 061a (sup.) e T/P-EM 137a (inf.). As linhas verticais indicam o cruzamento com as trilhas dos marégrafos

Para uma correta quantificação dessas inconsistências, foram extraídas e analisadas as séries temporais de TNMM, “ascendentes” e “descendentes”, nesses cruzamentos.

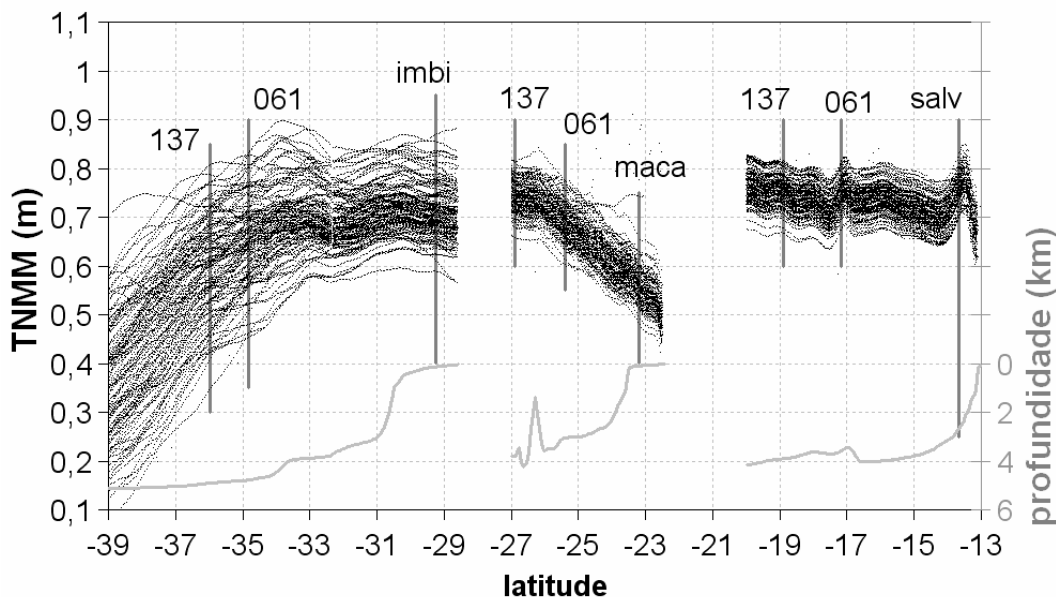


FIGURA 75 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA TNMM NAS TRILHAS DAS ESTAÇÕES DA RMPG

FONTE: Luz et al., 2007c

NOTA: Profundidades (linhas cinza, eixo direito) e estimativas de TNMM (pontilhados pretos, eixo esquerdo) para as trilhas dos marégrafos – Jason-1.152d (Imbituba), T/P-EM.202d (Macaé), e Jason-1.100d (Salvador). As linhas verticais indicam o cruzamento com as trilhas de referência preliminar, bem como os pontos mais próximos às estações da RMPG

As séries temporais analisadas a seguir foram obtidas a partir da interpolação dos valores de cada ciclo individual no ponto de cruzamento com a trilha transversal nominal, como ilustrado na Figura 76. Posteriormente, os gradientes de TNMM ao longo da trilha transversal seriam utilizados para a redução daqueles valores interpolados ao ponto de cruzamento das duas trilhas nominais. No entanto, constatou-se que tal redução não afetaria os resultados de modo significativo. Portanto, as séries temporais discutidas a seguir não se referem a um ponto único, mas sim a arranjos lineares como o exemplificado na mesma Figura – denominados, assim, “seções de cruzamento”.

A análise conjunta das séries temporais em cada seção de cruzamento foi feita por programa desenvolvido especificamente para tal (SSTOP_OCT), no já mencionado ambiente “octave”, versão livre do “matlab”. Os resultados, fornecidos sob forma de relatórios e gráficos, são exemplificados nos Quadros 8 e 9 e na Figura 77, que mostram os resultados correspondentes aos cruzamentos indicados nas figuras anteriores para Salvador e Imbituba. Além dos coeficientes de correlação entre séries temporais “ascendentes” e “descendentes”, o programa calcula também

os coeficientes de correlação entre as séries ao longo das respectivas trilhas, incluindo as trilhas secundárias dos marégrafos (“B”).

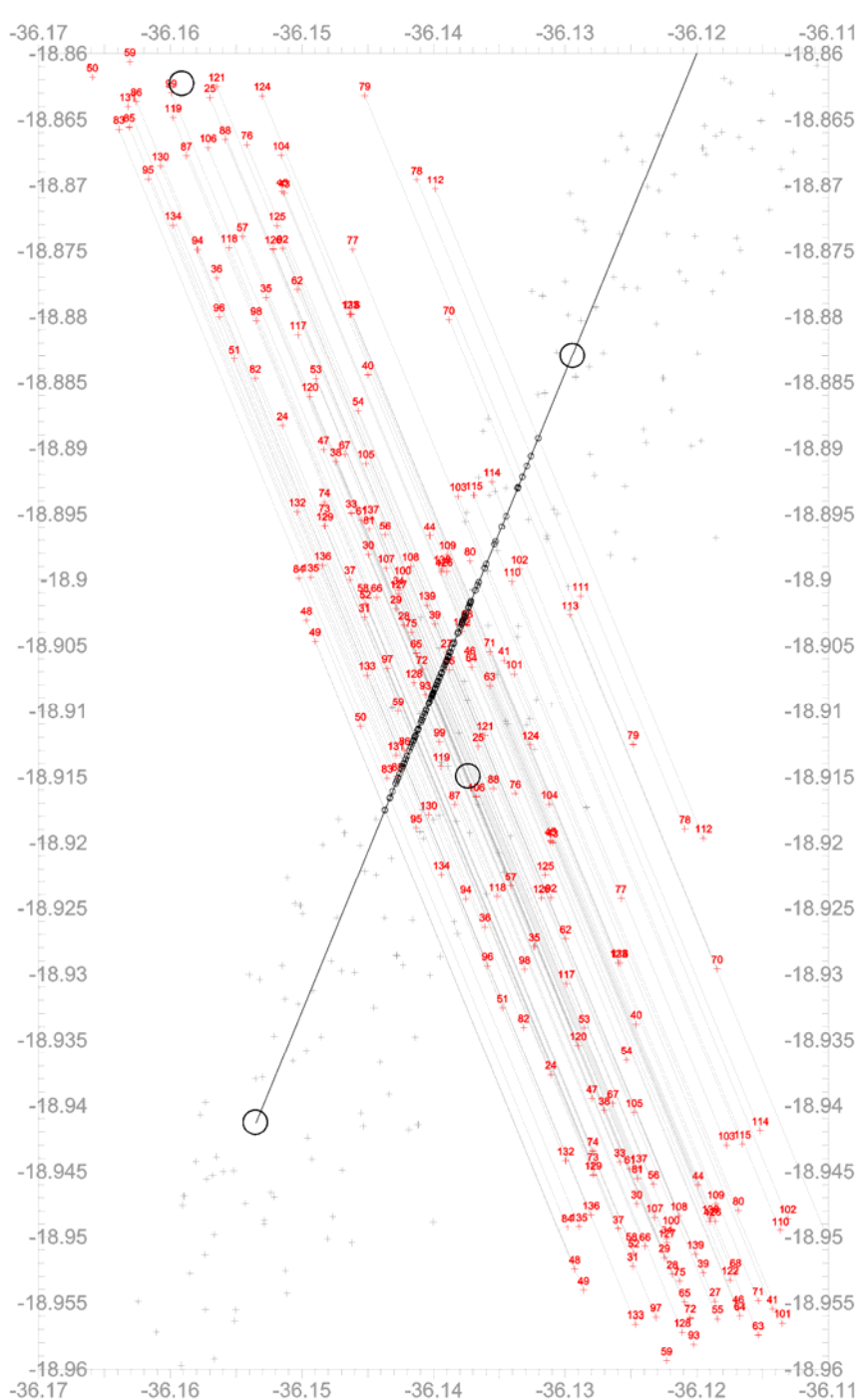


FIGURA 76 – INTERPOLAÇÃO DA TNMM PARA A TRILHA TRANSVERSAL NOMINAL

NOTA: Os círculos vazados representam os centros de cada bin; a linha preta representa a trilha nominal definida pelos respectivos bins; as linhas cinza representam as trilhas efetivamente observadas em cada ciclo, definidas pelos pontos de observação, representados em vermelho; os pontos de observação da trilha transversal são representados em cinza; e, finalmente, os pontos pretos ao longo da trilha nominal representam os cruzamentos daquelas trilhas efetivas

QUADRO 8 – EXEMPLO DE RELATÓRIO DE ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS
“ASCENDENTES” E “DESCENDENTES” DE TNMM PARA SALVADOR

| | | | | | |
|--------------------------------|---|--------|--------|--------|---------------|
| tracks passing STATION | = | salv | | | |
| REFERENCE tracks | = | nem061 | j1a061 | nem137 | j1a137 nem213 |
| ----- | | | | | |
| j1a100 : correl. A(j) x A(j-1) | = | 0.95 | 0.96 | 0.94 | 0.96 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.95 | 0.96 | 0.94 | 0.96 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 |
| nem176 : correl. B(j) x B(j-1) | = | 0.74 | 0.87 | 0.93 | 0.97 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.74 | 0.88 | 0.93 | 0.97 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.05 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |
| ----- | | | | | |
| correl. REF(A) x REF(B) | = | 0.85 | 0.60 | 0.89 | 0.89 0.95 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.85 | 0.62 | 0.89 | 0.89 0.95 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.04 | 0.12 | 0.03 | 0.02 0.01 |
| ----- | | | | | |
| correl. A x REF | = | 0.42 | 0.48 | 0.66 | 0.66 0.57 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.42 | 0.49 | 0.66 | 0.65 0.57 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.09 | 0.08 | 0.06 | 0.06 0.06 |
| no. pairs A x REF | = | 101 | 103 | 98 | 107 98 |
| time diff. A x REF (days)= | | 1.5 | 1.5 | -1.4 | -1.4 -4.4 |
| ----- | | | | | |
| correl. B x REF | = | 0.30 | 0.32 | 0.56 | 0.73 0.72 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.30 | 0.32 | 0.56 | 0.72 0.72 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.05 0.06 |
| no. pairs B x REF | = | 103 | 99 | 102 | 101 101 |
| time diff. B x REF (days)= | | 4.5 | 4.5 | 1.5 | 1.5 -1.4 |
| ----- | | | | | |
| SSTop along A, mean (m) | = | 0.726 | 0.745 | 0.756 | 0.777 0.762 |
| std.deviation(m)= | | 0.030 | 0.079 | 0.031 | 0.034 0.034 |
| no.obs | = | 107 | 106 | 107 | 107 107 |
| SSTop crossing A, mean (m) | = | 0.872 | 0.578 | 0.931 | 0.738 0.791 |
| std.deviation(m)= | | 0.029 | 0.118 | 0.186 | 0.079 0.160 |
| no.obs | = | 107 | 104 | 104 | 107 104 |
| SSTop differences,mean (m) | = | -0.128 | 0.135 | -0.181 | 0.029 -0.051 |
| std.deviation(m)= | | 0.055 | 0.055 | 0.079 | 0.028 0.037 |
| ----- | | | | | |
| SSTop along B, mean (m) | = | 0.678 | 0.810 | 0.844 | 0.827 0.811 |
| std.deviation(m)= | | 0.038 | 0.035 | 0.035 | 0.034 0.037 |
| no.obs | = | 106 | 107 | 107 | 107 107 |
| SSTop crossing B, mean (m) | = | 0.904 | 0.690 | 0.864 | 0.742 0.814 |
| std.deviation(m)= | | 0.028 | 0.120 | 0.151 | 0.031 0.164 |
| no.obs | = | 107 | 104 | 104 | 107 103 |
| SSTop differences,mean (m) | = | -0.204 | 0.088 | -0.041 | 0.077 -0.030 |
| std.deviation(m)= | | 0.074 | 0.047 | 0.033 | 0.035 0.027 |
| ----- | | | | | |

NOTA: Relatório produzido pelo programa SSTOP_OCT

QUADRO 9 – EXEMPLO DE RELATÓRIO DE ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS
“ASCENDENTES” E “DESCENDENTES” DE TNMM PARA IMBITUBA

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| tracks passing STATION | = | imbi | | | | | | | |
| REFERENCE tracks | = | j1a163 | nem239 | j1a239 | nem061 | j1a061 | nem137 | j1a137 | nem213 |
| ----- | | | | | | | | | |
| j1a152 : correl. A(j) x A(j-1) | = | 0.00 | 0.92 | 0.91 | 0.86 | 0.90 | 0.90 | 0.95 | 0.95 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.00 | 0.92 | 0.91 | 0.86 | 0.90 | 0.90 | 0.95 | 0.95 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| nem228 : correl. B(j) x B(j-1) | = | 0.00 | 0.73 | 0.83 | 0.84 | 0.86 | 0.89 | 0.91 | 0.95 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.00 | 0.73 | 0.83 | 0.84 | 0.86 | 0.89 | 0.91 | 0.95 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| correl. REF(A) x REF(B) | = | 0.90 | 0.90 | 0.89 | 0.85 | 0.92 | 0.92 | 0.96 | 0.98 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.89 | 0.90 | 0.89 | 0.85 | 0.92 | 0.92 | 0.96 | 0.98 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| ----- | | | | | | | | | |
| correl. A x REF | = | 0.45 | 0.45 | 0.42 | 0.43 | 0.37 | 0.49 | 0.38 | 0.43 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.44 | 0.45 | 0.42 | 0.43 | 0.37 | 0.49 | 0.38 | 0.43 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| no. pairs A x REF | = | 104 | 96 | 101 | 99 | 103 | 97 | 106 | 96 |
| time diff. A x REF (days)= | | -0.4 | -3.4 | -3.4 | -6.4 | 3.6 | 0.6 | 0.6 | -2.4 |
| ----- | | | | | | | | | |
| correl. B x REF | = | 0.17 | 0.32 | 0.45 | 0.31 | 0.24 | 0.37 | 0.34 | 0.29 |
| correl.check (bootstrap) | = | 0.16 | 0.32 | 0.44 | 0.31 | 0.24 | 0.36 | 0.34 | 0.28 |
| correl.st.dev.(bootstrap)= | | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.09 |
| no. pairs B x REF | = | 95 | 102 | 95 | 101 | 95 | 98 | 98 | 100 |
| time diff. B x REF (days)= | | 2.6 | -0.4 | -0.4 | -3.4 | 6.5 | 3.6 | 3.6 | 0.6 |
| ----- | | | | | | | | | |
| SSTop along A, mean (m) | = | 0.719 | 0.708 | 0.691 | 0.697 | 0.654 | 0.600 | 0.511 | 0.414 |
| std.deviation(m)= | | 0.054 | 0.087 | 0.057 | 0.075 | 0.085 | 0.098 | 0.114 | 0.129 |
| no.obs | = | 106 | 105 | 106 | 106 | 106 | 106 | 106 | 105 |
| SSTop crossing A, mean (m) | = | 0.683 | 0.767 | 0.758 | 0.682 | 0.634 | 0.583 | 0.521 | 0.423 |
| std.deviation(m)= | | 0.039 | 0.096 | 0.057 | 0.068 | 0.158 | 0.157 | 0.128 | 0.145 |
| no.obs | = | 105 | 104 | 103 | 107 | 104 | 104 | 107 | 104 |
| SSTop differences, mean (m) | = | 0.034 | -0.048 | -0.061 | 0.015 | -0.003 | -0.003 | -0.014 | -0.015 |
| std.deviation(m)= | | 0.049 | 0.057 | 0.061 | 0.072 | 0.098 | 0.095 | 0.124 | 0.119 |
| ----- | | | | | | | | | |
| SSTop along B, mean (m) | = | 0.620 | 0.703 | 0.707 | 0.702 | 0.669 | 0.632 | 0.591 | 0.531 |
| std.deviation(m)= | | 0.041 | 0.043 | 0.039 | 0.050 | 0.068 | 0.082 | 0.096 | 0.110 |
| no.obs | = | 102 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 | 103 |
| SSTop crossing B, mean (m) | = | 0.706 | 0.750 | 0.781 | 0.740 | 0.649 | 0.629 | 0.612 | 0.509 |
| std.deviation(m)= | | 0.041 | 0.090 | 0.054 | 0.053 | 0.146 | 0.139 | 0.104 | 0.148 |
| no.obs | = | 105 | 104 | 104 | 107 | 103 | 104 | 107 | 103 |
| SSTop differences, mean (m) | = | -0.072 | -0.050 | -0.064 | -0.034 | -0.006 | -0.020 | -0.021 | 0.004 |
| std.deviation(m)= | | 0.057 | 0.054 | 0.054 | 0.059 | 0.079 | 0.087 | 0.108 | 0.123 |
| ----- | | | | | | | | | |

NOTA: Relatório produzido pelo programa SSTOP_OCT

A fim de detectar a eventual influência de valores errôneos de TNMM – não removidos no processo de extração das séries temporais – sobre os coeficientes de correlação (e. g., TRAUTH, 2007, p. 66), foi incluída em SSTOP_OCT a verificação dos coeficientes de correlação mediante o processo de reamostragem, repetição e promediação conhecido como *bootstrap*. Tal procedimento também permite estimar

a confiabilidade do valor do coeficiente de correlação, por meio do desvio-padrão do conjunto de estimativas desse coeficiente para cada reamostragem do par de séries de TNMM.

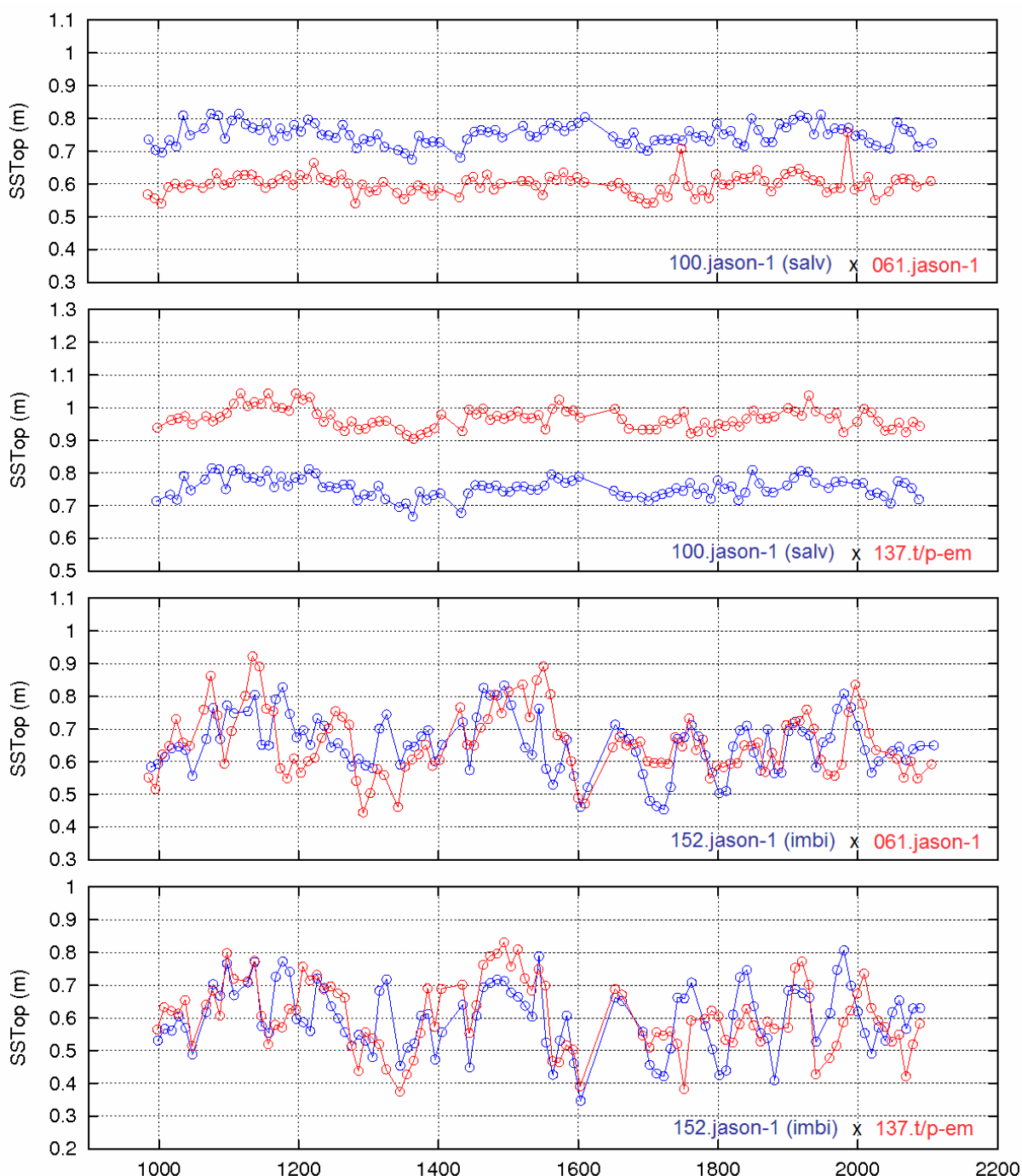


FIGURA 77 – SÉRIES TEMPORAIS DE TNMM NOS CRUZAMENTOS DE TRILHAS

NOTA: Séries temporais extraídas nas seções de cruzamento das trilhas de Salvador e Imbituba (100 e 152 de Jason-1, representadas em azul) com as trilhas de referência (061 de Jason-1 e 137 de T/P-EM, representadas em vermelho), entre setembro de 2002 (dia juliano 1000) e outubro de 2005 (dia juliano 2100). Os aparentes erros não puderam ser eliminados via critério 3σ .

Dois aspectos são evidentes na Figura 77. O primeiro é a maior variabilidade das séries temporais nas trilhas referentes a Imituba – como já discutido na Figura 74 e na Figura 75. O segundo fato diz respeito à inconsistência entre séries temporais “ascendentes” (nas trilhas de referência) e “descendentes” (nas trilhas de conexão dos marégrafos), nas trilhas referentes a Salvador. Enquanto a média das diferenças entre as séries para Imituba é -3 mm em ambas as seções mostradas na Figura 77 e ressaltadas no Quadro 9, os valores para Salvador são $+135$ mm e -181 mm (Quadro 8).

A fim de buscar as possíveis causas do tipo de inconsistência mencionado anteriormente, decidiu-se analisar todas as trilhas da área em questão, além de estender o limite leste da própria área de trabalho. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir.

A Figura 78 apresenta os desvios-padrão das diferenças de TNMM entre trilhas ascendentes e descendentes, nas seções de cruzamento. Duas características devem ser destacadas: a pronunciada variabilidade a partir de 32° S; e a aparente influência da plataforma de Abrolhos no aumento da variabilidade das diferenças de TNMM no seu entorno. Esta mesma região parece concentrar os valores mais altos das diferenças médias, como se observa na Figura 79. Além disso, esses valores mostram forte correlação com as trilhas de referência. Uma possível interpretação para tal comportamento vincula-se ao raio de 250 km do filtro espectral utilizado no cálculo das estimativas de TNMM, que poderia provocar uma “contaminação” das trilhas de referência com os resultados degradados do raso Platô de Abrolhos. De fato, os cruzamentos situados a uma distância maior, em relação às isóbatas indicadas, mostram rápido retorno às condições “normais”.

A Figura 80 mostra a TNMM na região de trabalho, obtida após a promediação das séries temporais em cada cruzamento de trilhas – ignorando-se as inconsistências mencionadas anteriormente. Ainda assim, observa-se a forte correlação entre esses valores “médios” da TNMM e as diferenças médias entre as séries temporais “ascendentes” e “descendentes”, na região de maiores diferenças. Também é interessante notar a homogeneidade dos gradientes de TNMM ao sul de 34° S, bem como na plataforma continental sul (a partir de 45° W, aproximadamente). Todavia, tal característica não é suficiente para justificar a

extração e eventual utilização dos valores de TNMM nas estações da RMPG envolvidas nestes estudos, já que a TNMM tem comportamento problemático nas regiões costeiras – conforme discussões anteriores (seção 2.3.1, p. 53).

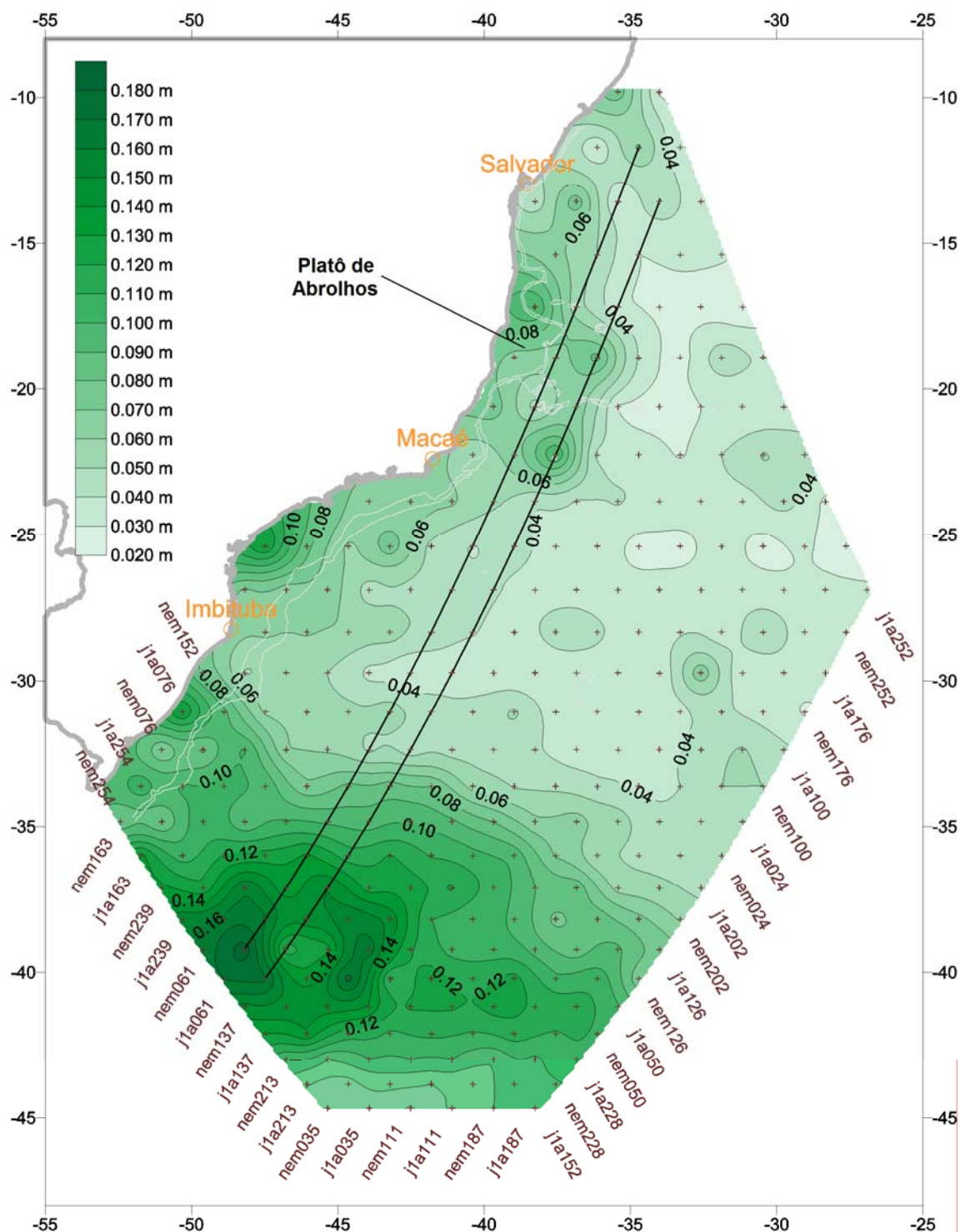


FIGURA 78 – DESVIOS-PADRÃO DAS DIFERENÇAS DE TNMM

NOTA: Incluem-se as isóbatas de 200 e 1000 m

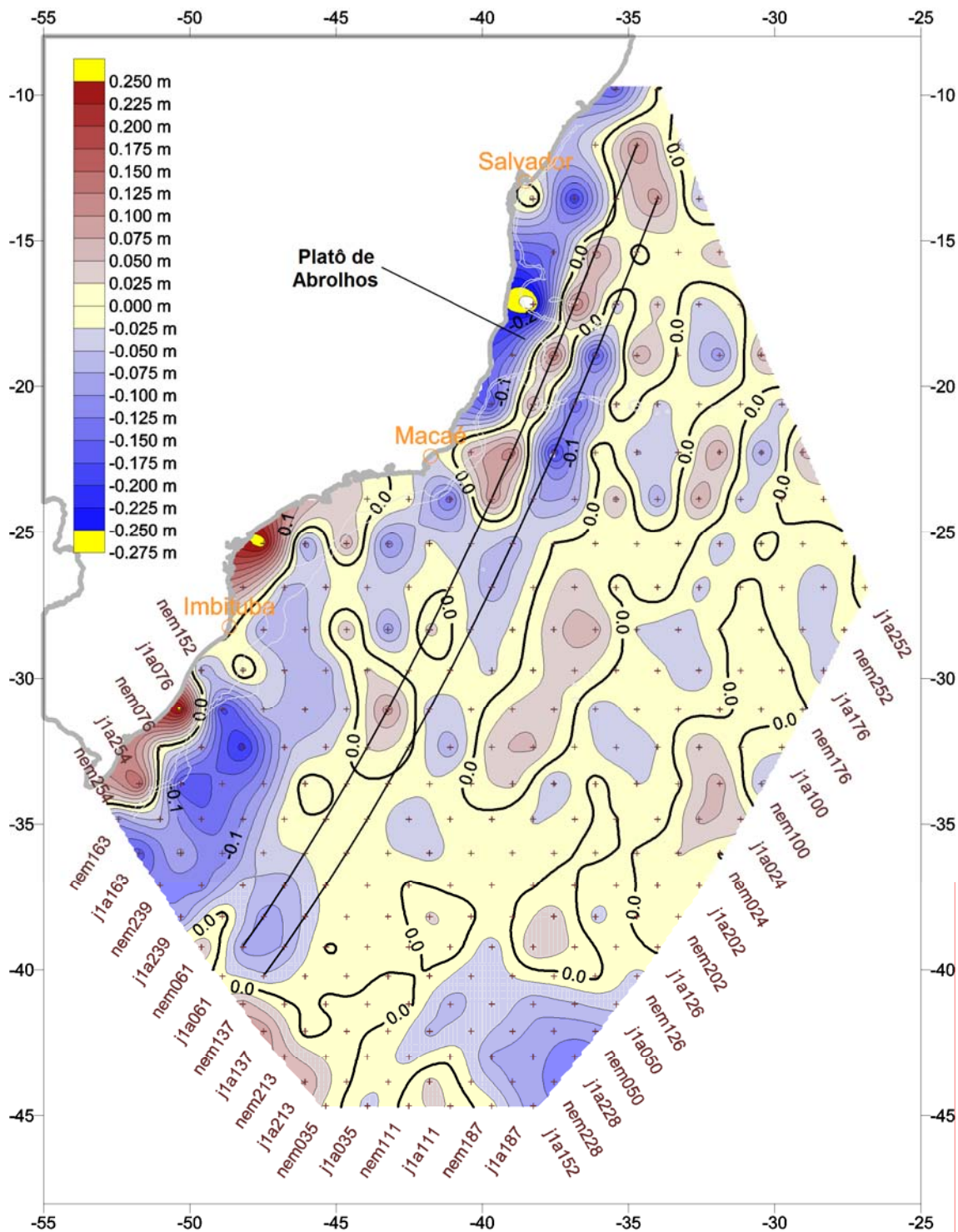


FIGURA 79 – MÉDIAS DAS DIFERENÇAS ENTRE AS SÉRIES TEMPORAIS DE TNMM NOS CRUZAMENTOS DE TRILHAS ASCENDENTES (REF) E DESCENDENTES (MARÉGRAFOS)

NOTA: Incluem-se as isóbatas de 200 e 1000 m

Esses resultados levaram à hipótese de que as estimativas de TNMM obtidas com o filtro de 250 km podem não ser adequadas à pretendida compatibilização dos níveis de referência das observações de ALTSAT ao longo das

trilhas relativas às estações da RMPG. Conseqüentemente, a primeira abordagem de filtragem, não tão abrangente (30 km), assume uma nova importância.

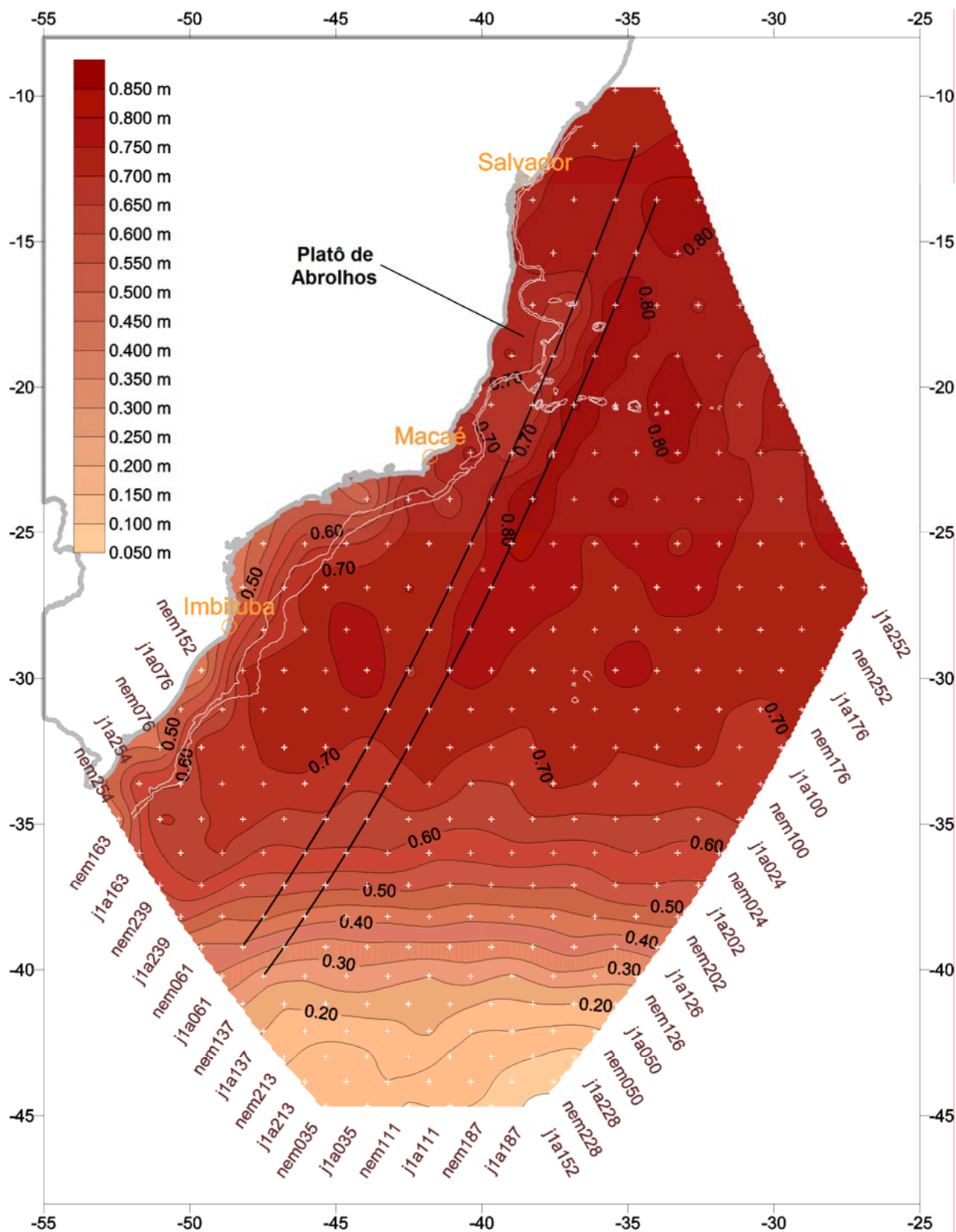


FIGURA 80 – TNMM MÉDIA NA REGIÃO DE TRABALHO EXTENDIDA

NOTA: Incluem-se as isóbatas de 200 e 1000 m

Além da possível inadequação do filtro utilizado, a solução global fornecida pelo DGFI inclui apenas Jason-1 e T/P-EM, enquanto que a base BINs considera várias outras missões, e até diferentes soluções para uma mesma missão – como no caso do T/P, do qual existem dados referentes aos MGDR-B e MGDR-C (DGFI, 2007). Os dados da missão Envisat assumem particular importância, em vista de sua maior densidade espacial – como no já mencionado caso de Imbituba, em que a trilha referente a T/P e Jason-1 não está posicionada de forma ideal (Figura 64, p. 146).

Com isso, não foi possível estabelecer uma referência adequada para a pretendida propagação da TNMM até as estações da RMPG. Todavia, isso não impediu a análise de suas observações e a realização de testes de aplicação dos procedimentos descritos anteriormente para correlação entre ALTSAT e marégrafos, descritos na próxima seção.

Para concluir a discussão da solução global de TNMM do DGFI, é necessário ressaltar a existência de uma tendência de elevação, detectada visualmente em alguns dos gráficos de séries temporais gerados por SSTOP_OCT. No entanto, não foi feita qualquer tentativa de quantificação das tendências nas séries temporais de TNMM analisadas nesta Tese.

5.3. BASE DE DADOS DA RMPG

Os dados de nível do mar coletados nas estações da RMPG são fornecidos sem filtragem, i. e., com a frequência de amostragem original, em arquivos diários, segundo um formato genérico de distribuição – arquivos ASCII (texto puro) contendo data, hora e nível d'água. A Tabela 12 apresenta um sumário dos dados enviados pelo IBGE, e o Quadro 10 mostra exemplos das variações do formato genérico e das leituras inconsistentes detectadas na primeira inspeção, visual, dos mesmos.

A inspeção visual dos dados recebidos também revelou a existência de níveis de ruído heterogêneos – ora oscilações pronunciadas com frequências superiores às do espectro normal de maré, ora períodos com atenuação anômala. A Figura 81 mostra exemplos dessas ocorrências. Uma descrição detalhada desses exemplos é apresentada na próxima seção.

Ressalta-se que não se fez qualquer tentativa de utilização dos registros gráficos das estações da RMPG, que se encontram em tratamento no IBGE.

TABELA 12 – SÍNTESE DOS DADOS DE NÍVEL DO MAR ENVIADOS PELO IBGE

| estação | data inicial | data final | intervalo de amostragem |
|----------|--------------|------------|-------------------------|
| IMBITUBA | 22/08/2001 | 31/12/2006 | 5 min |
| MACAÉ | 13/07/2001 | 31/12/2006 | 5 min |
| SALVADOR | 15/10/2004 | 31/12/2006 | 6 min ; 60 min |

QUADRO 10 – EXEMPLOS DE DADOS DE NÍVEL DO MAR DO IBGE

| | 1 | 2 | 3 |
|------------|--------------------------------------|-------|-----------|
| |+.....0.....+.....0.....+.....0 | | |
| 19/11/2003 | 13:22:00 | 2.099 | [ponto] |
| 19/11/2003 | 13:27:00 | 2.085 | |
| 19/11/2003 | 13:32:01 | 2.103 | [+2min] |
| 19/11/2003 | 13:37:00 | 2.089 | |
| 19/11/2003 | 13:42:00 | 2.075 | |
| 15/10/2004 | 00:12:00 | 3,211 | |
| 15/10/2004 | 00:18:00 | 3,259 | [vírgula] |
| 15/10/2004 | 00:24:00 | 3,318 | |
| 19/11/2005 | 19:30:00 | 4,178 | |
| 19/11/2005 | 19:36:00 | 4,154 | |
| 19/11/2005 | 19:42:00 | 41138 | *** |
| 19/11/2005 | 19:48:00 | 4,073 | |
| 19/11/2005 | 19:54:00 | 4,034 | |
| 19/11/2005 | 20:00:00 | 3,959 | |
| 19/11/2005 | 20:06:00 | | *** |
| 19/11/2005 | 20:12:00 | 3,926 | |
| 19/11/2005 | 20:18:00 | 3,889 | |
| 9/10/2006 | 23:42:59 | 2.557 | |
| 9/10/2006 | 23:48:59 | 2.576 | [-1seg] |
| 9/10/2006 | 23:55:00 | 2.600 | |

5.3.1 – Crítica preliminar

Em função das ocorrências mencionadas, os dados recebidos foram submetidos a uma primeira etapa de crítica, por intermédio de um programa

FORTRAN (CRITNM) elaborado especificamente com esse objetivo. Tal crítica preliminar consistiu da eliminação das leituras possivelmente errôneas (como em 19/11/2005, 19:42, no Quadro 10), o preenchimento de pequenas lacunas (idem, 20:06) e a filtragem das observações brutas, gerando dados horários para a segunda etapa de crítica – interpolando quando necessário, como no caso dos horários não centrados mostrados no mesmo Quadro (dia 19/11/2003). Os arquivos foram processados em lotes mensais, de forma a permitir uma futura caracterização sazonal das observações brutas. A seguir discute-se cada um daqueles itens de crítica.

A rejeição de inconsistências baseou-se na análise das diferenças entre observações sucessivas e nos desvios em relação às médias de tais diferenças, desconsiderando-se as eventuais lacunas. As tolerâncias foram determinadas empiricamente a partir dos próprios dados, resultando nos valores de 20 cm para as diferenças e de 8 cm para os desvios, aplicados a todas as estações consideradas. No caso dos dados mostrados na Figura 81 (Imbituba, jan-2003), não houve rejeições, o que permitiria concluir que aqueles valores empíricos são suficientemente flexíveis para admitir oscilações como as mostradas. No entanto, posteriormente foram detectadas rejeições de observações consistentes, em períodos de oscilações extremas com causas meteorológicas – ver discussão da Tabela 13.

A Figura 82 apresenta a distribuição de freqüências relativas dos 8827 valores de diferença de leituras sucessivas para o mesmo período.

Ressalta-se que aqueles valores empíricos estão relacionados aos intervalos de amostragem utilizados nas estações da RMPG (Tabela 12) e às próprias amplitudes de maré nessas estações. Assim, no caso da futura inclusão de outras estações maregráficas, a determinação daquela tolerância deverá ser objeto de nova discussão. Um possível aprimoramento deste parâmetro de crítica, evitando a necessidade de nova análise empírica, refere-se à definição automática da tolerância, com base, por exemplo, no critério de três vezes o desvio-padrão – este seria um exemplo de aplicação da já mencionada caracterização sazonal.

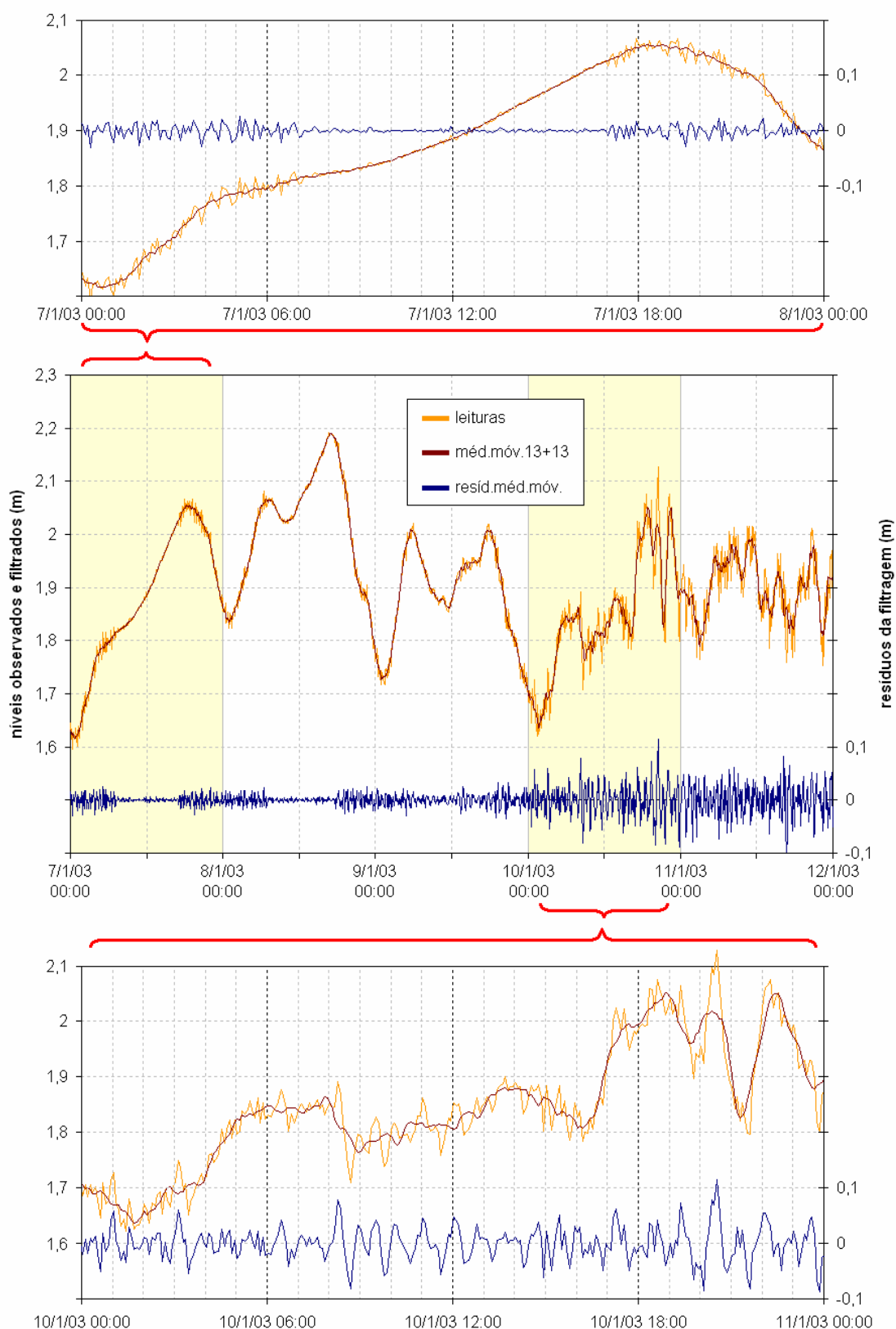


FIGURA 81 – EXEMPLOS DE VARIABILIDADE DOS DADOS ENVIADOS PELO IBGE

NOTA: dados de Imbituba. As leituras com intervalo de 5 minutos são inicialmente “suavizadas”, mediante a dupla aplicação de média móvel de 13 pontos (“méd. móv. 13+13”), para a posterior filtragem via *spline* cúbica.

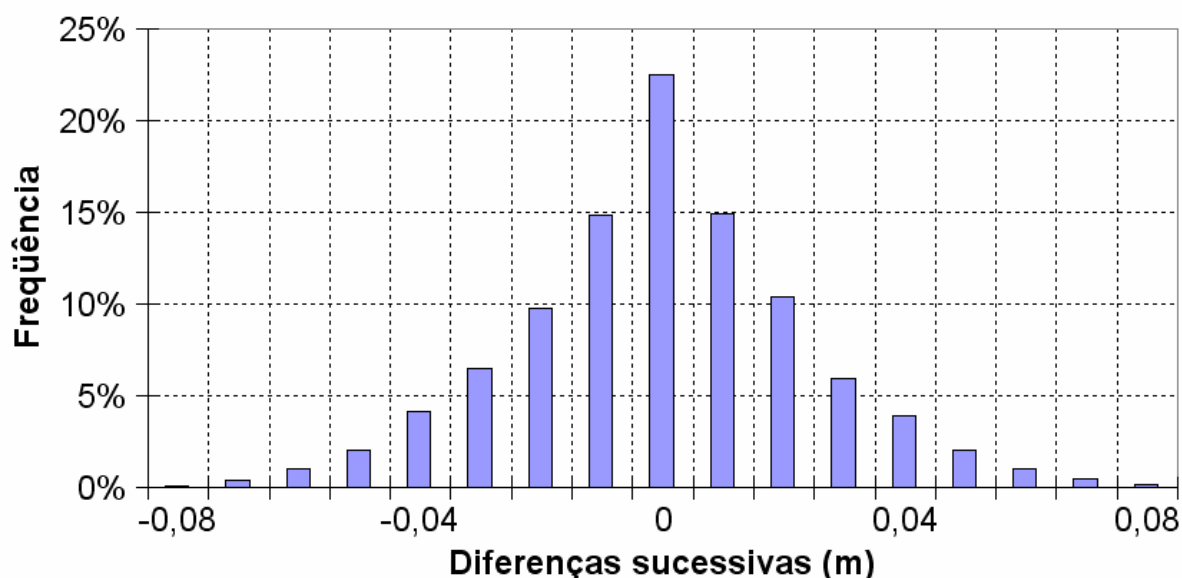


FIGURA 82 – EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO DAS DIFERENÇAS SUCESSIVAS

NOTA: dados de Imbituba em janeiro de 2003

A extração de níveis horários atendeu à necessidade do sistema computacional utilizado na segunda etapa de crítica, a ser descrita posteriormente. Não foi possível proceder-se a uma simples seleção das leituras referentes aos horários “cheios”, em função dos problemas já mencionados – existência de oscilações pronunciadas e horários de leitura não-centrados. Assim, após a eliminação das leituras inconsistentes, as séries mensais foram suavizadas para servir de base à interpolação de valores horários via *spline* cúbica – cuja implementação computacional é dada por Press et al. (2001, p. 107). Pequenas lacunas, i. e., períodos de até 3 horas sem leituras – no arquivo original ou após a rejeição de inconsistências – foram preenchidas com valores interpolados também via *spline* cúbica a partir das leituras filtradas. Tais lacunas serão possivelmente preenchidas, sem a necessidade de interpolação, quando os dados decorrentes do tratamento dos registros gráficos estiverem disponíveis. Outra alternativa para tal preenchimento seria o recurso a estações maregráficas vizinhas – como a operada na barra da Lagoa de Santo Antônio, aproximadamente 30 km ao sul de Imbituba (FERREIRA, 2008).

A suavização dos dados de frequência de 5 ou 6 minutos foi realizada com a dupla aplicação de média móvel de 13 pontos. Inicialmente as leituras foram promediadas, e os resíduos desta primeira filtragem também foram promediados.

Estes resíduos filtrados foram então retro-substituídos na série de leituras filtradas, dando origem a uma série mais adequada ao processo de interpolação. A perda de dados inerente ao processo de filtragem nas imediações das lacunas não tem impacto significativo, já que a interpolação foi limitada a lacunas de até 3 horas, com 20 leituras antes e depois das lacunas. A Figura 83 apresenta exemplos de interpolação de níveis horários e de uma lacuna não preenchida – neste caso, nenhuma das pequenas lacunas mostradas atendeu ao critério de 20 leituras anteriores/posteriores, resultando em uma “grande” lacuna, cujo preenchimento é objeto da terceira etapa de crítica.

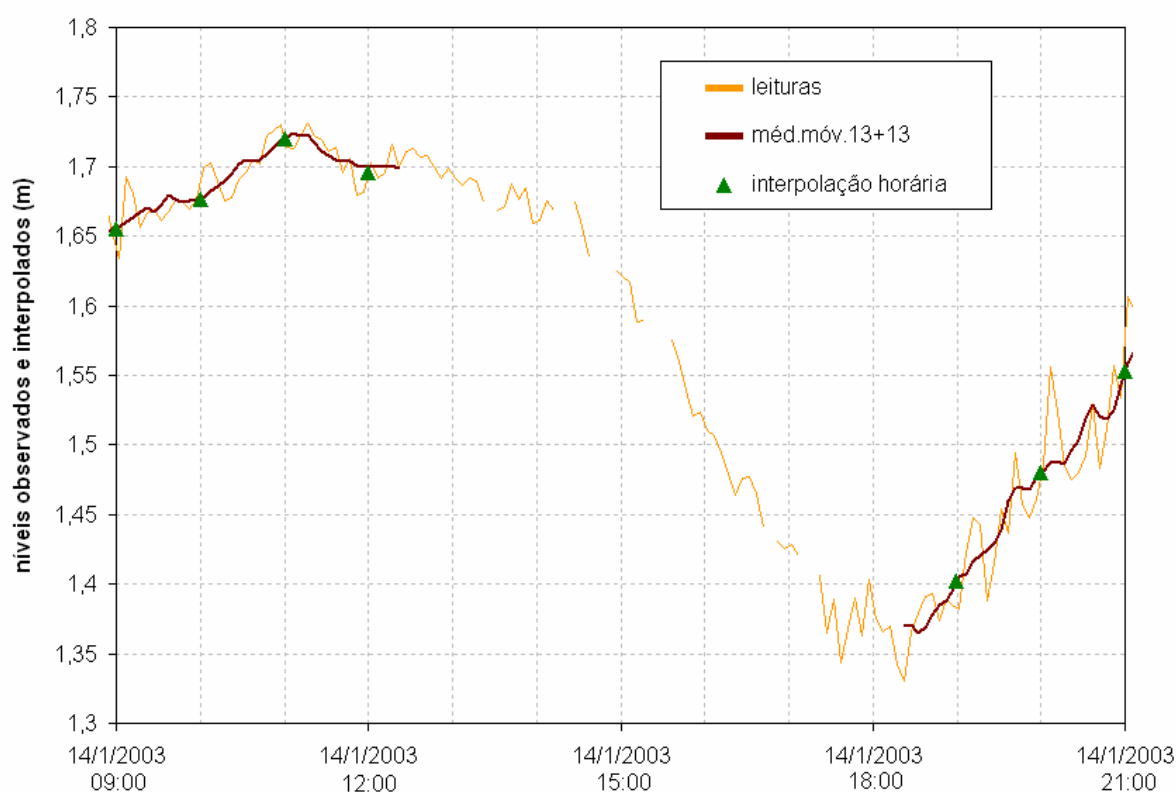


FIGURA 83 – EXEMPLO DE “SUAVIZAÇÃO” (VIA MÉDIA MÓVEL) E FILTRAGEM (INTERPOLAÇÃO VIA *SPLINE* CÚBICA)

NOTA: dados de Imituba

O Quadro 11 apresenta um exemplo do relatório produzido pelo CRITNM. A discriminação de intervalos foi introduzida em função da constatação de que, dentre os arquivos recebidos, alguns continham níveis horários – os quais mostraram-se, mais tarde, inconsistentes.

A Tabela 13 resume os resultados da crítica preliminar com o CRITNM. O número relativamente alto de observações rejeitadas em dezembro de 2004 refere-se às oscilações causadas pelo *tsunami* de Sumatra-Andaman (LUZ, FREITAS, 2005). As oscilações pronunciadas que causaram um grande número de rejeições em junho de 2006 tiveram causa provável em evento meteorológico extremo, no início desse mês – o que leva ao questionamento da adequação das tolerâncias mencionadas anteriormente e reforça a recomendação de mudança do critério.

QUADRO 11 – EXEMPLO DE RELATÓRIO RESUMIDO DO CRITNM

| | | |
|-------------------------------------|------------|----------|
| início: | 1/11/2004 | 0: 0: 0 |
| final: | 30/11/2004 | 23:55: 0 |
| numero de observacoes validas | : | 5976 |
| numero de observacoes rejeitadas | : | 2 |
| numero de lacunas maiores que 3.0h: | | 1 |
| contagem de intervalos (minutos): | | |
| 5: | 5971 | 6: 0 |
| 10: | 3 | 12: 0 |
| intervalo padrao: | 5 minutos | |

NOTA: dados de Macaé

5.3.2 – Análise harmônica e filtragem

As condições para preenchimento de lacunas, mencionadas anteriormente – período máximo de 3 horas, delimitado por um mínimo de 20 leituras – foram estabelecidas empiricamente, com base no período aproximado da componente harmônica semi-diurna (M2), i. e., 12 horas. O preenchimento de lacunas maiores foi realizado de forma diversa, recorrendo-se à previsão de maré baseada na análise harmônica das séries anuais de observações do nível do mar.

Além de auxiliar o preenchimento de lacunas, a análise harmônica permitiu refinar a crítica preliminar, sob o ponto de vista da aderência das observações à componente determinística do sinal, i. e., a maré astronômica. Em alguns casos, a comparação entre as observações e a previsão evidenciou problemas existentes nos dados brutos, tais como diferentes bases de tempo e preenchimento errôneo de lacunas.

TABELA 13 – RESUMO DOS RESULTADOS DA CRÍTICA PRELIMINAR DOS DADOS DA ESTAÇÃO DA RMPG EM MACAÉ

| início | final | número de observações | | lacunas > 3h | |
|------------------|------------------|-----------------------|---------|--------------|---------------------|
| | | válidas | rejeit. | número | tam. (dias) |
| 13/07/2001 17:45 | 31/07/2001 23:55 | 4952 | 16 | 1 | 1.0 |
| 1/08/2001 0:00 | 31/08/2001 23:55 | 8616 | 1 | 1 | 1.0 |
| 1/09/2001 0:00 | 30/09/2001 23:55 | 8600 | 15 | - | - |
| 1/10/2001 0:00 | 31/10/2001 23:55 | 8878 | 20 | - | - |
| 1/11/2001 0:00 | 30/11/2001 23:55 | 8624 | - | - | - |
| 1/12/2001 0:00 | 31/12/2001 23:55 | 8332 | 2 | 2 | 1.0/1.0 |
| 1/01/2002 0:00 | 31/01/2002 12:10 | 8736 | - | 1 | 0.5 |
| 1/02/2002 0:00 | 28/02/2002 23:55 | 7639 | 6 | 2 | 1.0/0.4 |
| 1/03/2002 0:00 | 31/03/2002 23:55 | 8914 | 5 | - | - |
| 1/04/2002 0:00 | 30/04/2002 23:55 | 8635 | - | - | - |
| 1/05/2002 0:00 | 31/05/2002 23:55 | 7896 | 2 | 1 | 3.6 |
| 1/06/2002 0:00 | 30/06/2002 23:55 | 8633 | - | - | - |
| 1/07/2002 0:00 | 31/07/2002 23:55 | 8913 | 4 | - | - |
| 1/08/2002 0:00 | 31/08/2002 23:55 | 8912 | 12 | - | - |
| 1/09/2002 0:00 | 30/09/2002 23:55 | 8631 | 2 | - | - |
| 1/10/2002 0:00 | 31/10/2002 23:55 | 8632 | - | 1 | 1.0 |
| 1/11/2002 0:00 | 30/11/2002 23:55 | 8635 | - | - | - |
| 1/12/2002 0:00 | 31/12/2002 23:55 | 8917 | 2 | - | - |
| 1/01/2003 0:00 | 31/01/2003 23:55 | 8915 | 1 | - | - |
| 1/02/2003 0:00 | 28/02/2003 23:55 | 8038 | 1 | - | - |
| 1/03/2003 0:00 | 31/03/2003 23:55 | 8922 | - | - | - |
| 1/04/2003 0:00 | 30/04/2003 23:55 | 8633 | - | - | - |
| 1/05/2003 0:00 | 31/05/2003 23:55 | 8773 | 7 | 1 | 0.5 |
| 1/06/2003 0:00 | 30/06/2003 23:55 | 8629 | 3 | - | - |
| 1/07/2003 0:00 | 31/07/2003 23:55 | 8919 | - | - | - |
| 1/08/2003 0:00 | 31/08/2003 23:55 | 8923 | - | - | - |
| 1/09/2003 0:00 | 30/09/2003 23:55 | 8626 | - | - | - |
| 1/10/2003 0:00 | 31/10/2003 23:55 | 8335 | 10 | 2 | 1.0/1.0 |
| 1/11/2003 0:00 | 30/11/2003 23:55 | 8627 | 2 | - | - |
| 1/12/2003 0:00 | 31/12/2003 23:55 | 8884 | 1 | 1 | 0.1 |
| 1/01/2004 0:00 | 29/01/2004 9:05 | 8168 | - | 1 | 12.0 |
| 10/02/2004 8:10 | 29/02/2004 23:55 | 5617 | 2 | - | - |
| 1/03/2004 0:00 | 31/03/2004 23:55 | 8913 | - | - | - |
| 1/04/2004 0:00 | 30/04/2004 23:55 | 8633 | 3 | - | - |
| 1/05/2004 0:00 | 31/05/2004 23:55 | 8878 | 43 | - | - |
| 1/06/2004 0:00 | 30/06/2004 23:55 | 8625 | 9 | - | - |
| 1/07/2004 0:00 | 31/07/2004 23:55 | 8910 | 7 | - | - |
| 1/08/2004 0:00 | 31/08/2004 23:55 | 8744 | 6 | 1 | 0.5 |
| 1/09/2004 0:00 | 30/09/2004 23:55 | 8461 | 7 | 1 | 0.5 |
| 1/10/2004 0:00 | 30/10/2004 23:55 | 7966 | - | 4 | 0.9/0.9/ 0.5/1.0 |
| 1/11/2004 0:00 | 30/11/2004 23:55 | 5976 | 2 | 1 | 9.2 |
| 1/12/2004 0:00 | 31/12/2004 23:55 | 8845 | 80 | - | - |
| 1/01/2005 0:00 | 31/01/2005 23:55 | 8916 | - | - | - |
| 1/02/2005 0:00 | 22/02/2005 10:05 | 6162 | 1 | 1 | 7.3 |
| 1/03/2005 16:10 | 31/03/2005 23:55 | 8730 | - | - | - |
| 1/04/2005 0:00 | 30/04/2005 23:55 | 8312 | - | 1 | 1.1 |
| 1/05/2005 0:00 | 31/05/2005 23:55 | 8636 | - | 1 | 1.0 |
| 1/06/2005 0:00 | 30/06/2005 23:55 | 8636 | - | - | - |
| 1/07/2005 0:00 | 31/07/2005 23:55 | 8617 | 17 | 1 | 1.0 |
| 1/08/2005 0:00 | 31/08/2005 23:55 | 8913 | 11 | - | - |
| 1/09/2005 0:00 | 30/09/2005 23:55 | 8466 | 5 | 1 | 0.6 |
| 1/10/2005 0:00 | 31/10/2005 23:55 | 8640 | - | 2 | 0.4/0.6 |
| 1/11/2005 0:00 | 30/11/2005 23:55 | 8635 | - | - | - |
| 1/12/2005 0:00 | 31/12/2005 23:55 | 8924 | - | - | - |
| 1/01/2006 0:00 | 31/01/2006 23:55 | 8928 | - | 1 | 0.4 |
| 1/02/2006 8:30 | 28/02/2006 23:55 | 7962 | - | - | - |
| 1/03/2006 0:00 | 31/03/2006 23:55 | 8791 | 1 | 1 | 0.5 |
| 1/04/2006 0:00 | 30/04/2006 23:55 | 7179 | 7 | 1 | 5.0 |
| 1/05/2006 0:00 | 14/05/2006 8:05 | 3840 | - | 1 | 18.0 |
| 1/06/2006 8:30 | 30/06/2006 23:55 | 8364 | 165 | - | - |
| 1/07/2006 0:00 | 31/07/2006 23:55 | 8913 | 10 | - | - |
| 1/08/2006 0:00 | 31/08/2006 23:55 | 8912 | 12 | - | - |
| 1/09/2006 0:00 | 30/09/2006 23:55 | 4597 | 5 | 1 | 14.0 |
| 1/10/2006 0:00 | 31/10/2006 23:55 | 8920 | - | - | - |
| 1/11/2006 0:00 | 30/11/2006 23:55 | 4879 | 6 | 1 | 13.0 |
| 1/12/2006 0:00 | 31/12/2006 23:55 | 8923 | - | - | - |

Foi utilizado o sistema computacional SLPR2, disponibilizado pela Universidade do Hawaii (CALDWELL, KILONSKY, 1992; CALDWELL, 2001), e distribuído nos cursos de observação e análise de dados de nível do mar da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (e. g., IOC, 1993). Os dados de entrada para esta etapa de crítica são os níveis horários interpolados pelo programa CRITNM, descrito na seção anterior, e formatados adequadamente.

Com os dados de entrada organizados em arquivos anuais, o primeiro passo da utilização do SLPR2 para controle de qualidade é a escolha do período de 12 meses a ser utilizado na análise harmônica.

Com as previsões, foi possível preencher algumas das lacunas. O programa desenvolvido para tal atividade faz a interpolação das diferenças entre previsão e observação nas imediações de cada lacuna, de forma a incluir informação a respeito da variação do NMM. E, com algumas das lacunas preenchidas, foi possível aplicar o mesmo filtro de 168 horas (equivalentes a 7 dias) utilizado por Luz, Guimarães (2003) para obtenção do NMM “semanal” (Figura 36). Na verdade, Pugh (1987) recomenda a utilização desse tipo de filtro para a eliminação das componentes harmônicas mais significativas, como preparação para a obtenção de NMM mensais e anuais. Nesta Tese, o filtro de 168 horas foi utilizado como alternativa à utilização do modelo oceânico global FES2004 (LYARD et al., 2006), aplicado na base BINs do DGFI. O FES2004 serviria para homogeneização das observações da RMPG em relação aos dados de BINs; no entanto, dificuldades operacionais impediram a extração das informações necessárias, levando à adoção daquele filtro para a obtenção de um NMM “de curto prazo” (NMM-168h), que permitisse a integração dos dados das estações da RMPG às observações de ALTSAT.

Portanto, arquivos horários de NMM-168h foram disponibilizados para a interpolação de valores referentes aos instantes de passagem dos satélites altimétricos, como se apresenta a seguir.

6. ESTRATÉGIAS PARA MODERNIZAÇÃO DA RAAP VIA INTEGRAÇÃO DE MÚLTIPLAS TÉCNICAS E MODELOS GEODÉSICOS

6.1. PROPAGAÇÃO DA TNMM ATÉ AS ESTAÇÕES DA RMPG

Como discutido na seção 5.2, não foi possível estabelecer uma referência adequada para a propagação da TNMM até a costa e sua integração às respectivas observações da RMPG. Em contraposição, foi levantada a hipótese de que a filtragem dos dados das estações da RMPG pudesse aprimorar os resultados dessa integração sem a necessidade de compatibilização dos respectivos referenciais.

Assim, foram extraídas as alturas do NMM-168h para os instantes de leitura altimétrica nos *bins* mais próximos às estações maregráficas. Estes foram definidos com base na disponibilidade de dados e na homogeneidade de situação, resultando na escolha de *bins* situados a aproximadamente 80 km de cada estação.

A hipótese de adequação do NMM-168h acabou sendo descartada, após a obtenção de baixas correlações entre as respectivas séries temporais – Salvador (0,31), Macaé (0,22) e Imbituba (0,33). A influência do modelo de maré utilizado na correção dos dados do DGFI (FES2004, LYARD et al., 2006) não pôde ser determinada.

Por outro lado, a integração ALTSAT-RMPG via altitudes elipsoidais das referências maregráficas também não foi realizada, já que não foi possível analisar as informações de controle geodésico das estações de Macaé e Salvador.

6.2. A SUB-REDE IMBITUBA-MACAÉ-SALVADOR

Foi iniciada a montagem da sub-rede que permitirá o cálculo de altitudes físicas para uma parte da RAAP entre as estações da RMPG em Imbituba, Macaé e Salvador e, conseqüentemente, uma análise mais profunda das diferenças entre aquelas altitudes e os NMM locais.

Na Figura 84, observa-se que é possível obter uma sub-rede com certo grau de homogeneidade temporal, porém espacialmente questionável, de Imbituba até

aproximadamente o limite interestadual SP/RJ, longitude 44° W. De fato, os resultados fornecidos por IDNOS (Figura 85) mostram a total inadequação geométrica da rede a leste desse ponto.

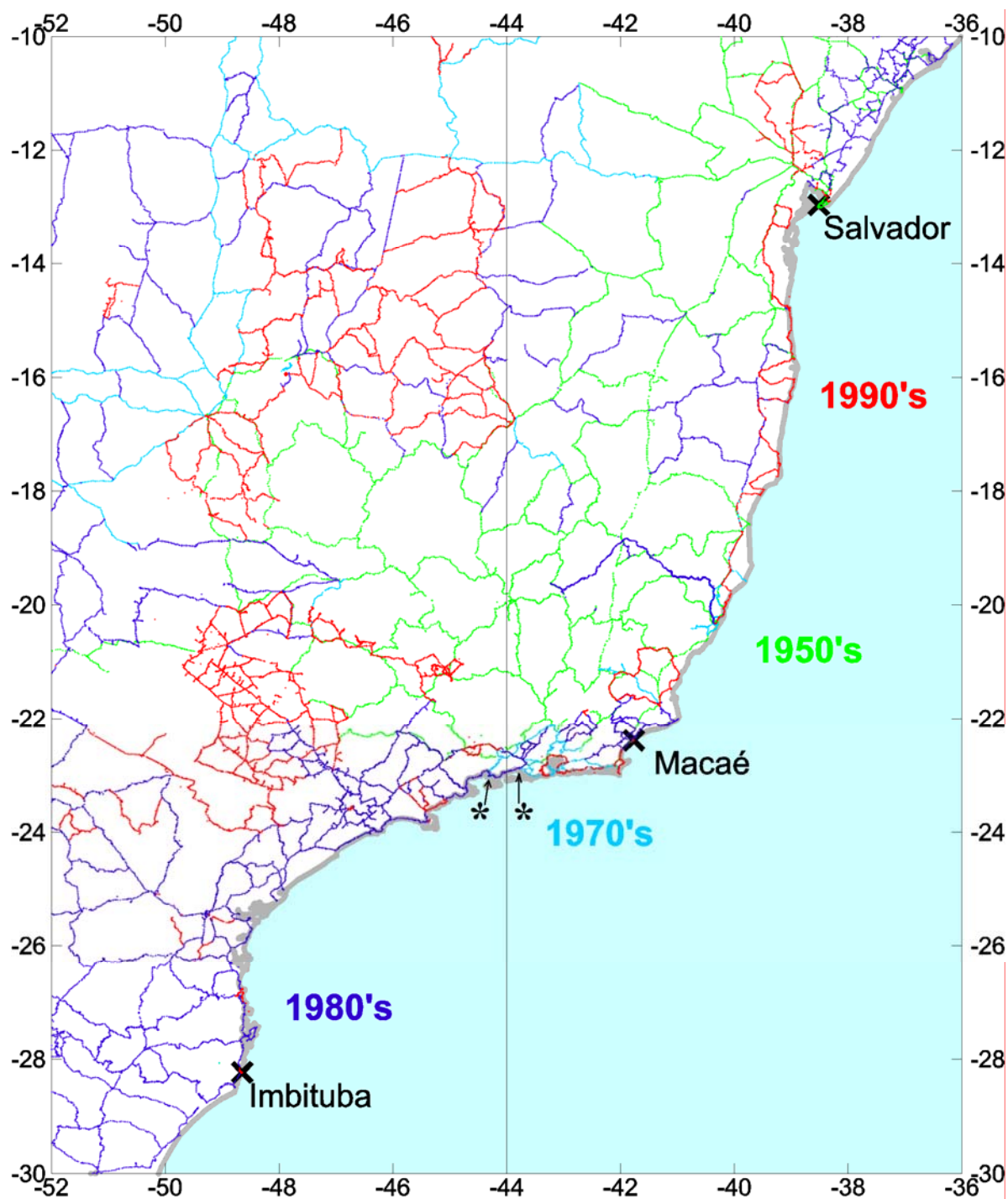


FIGURA 84 – HETEROGENEIDADE TEMPORAL DA RAAP ENTRE O DVB-I E SALVADOR

NOTA: o meridiano de 44° W é mostrado como referência para a análise da Figura 85. A linha assinalada (década de 1980) foi rejeitada no processo de montagem da rede com o programa IDNOS

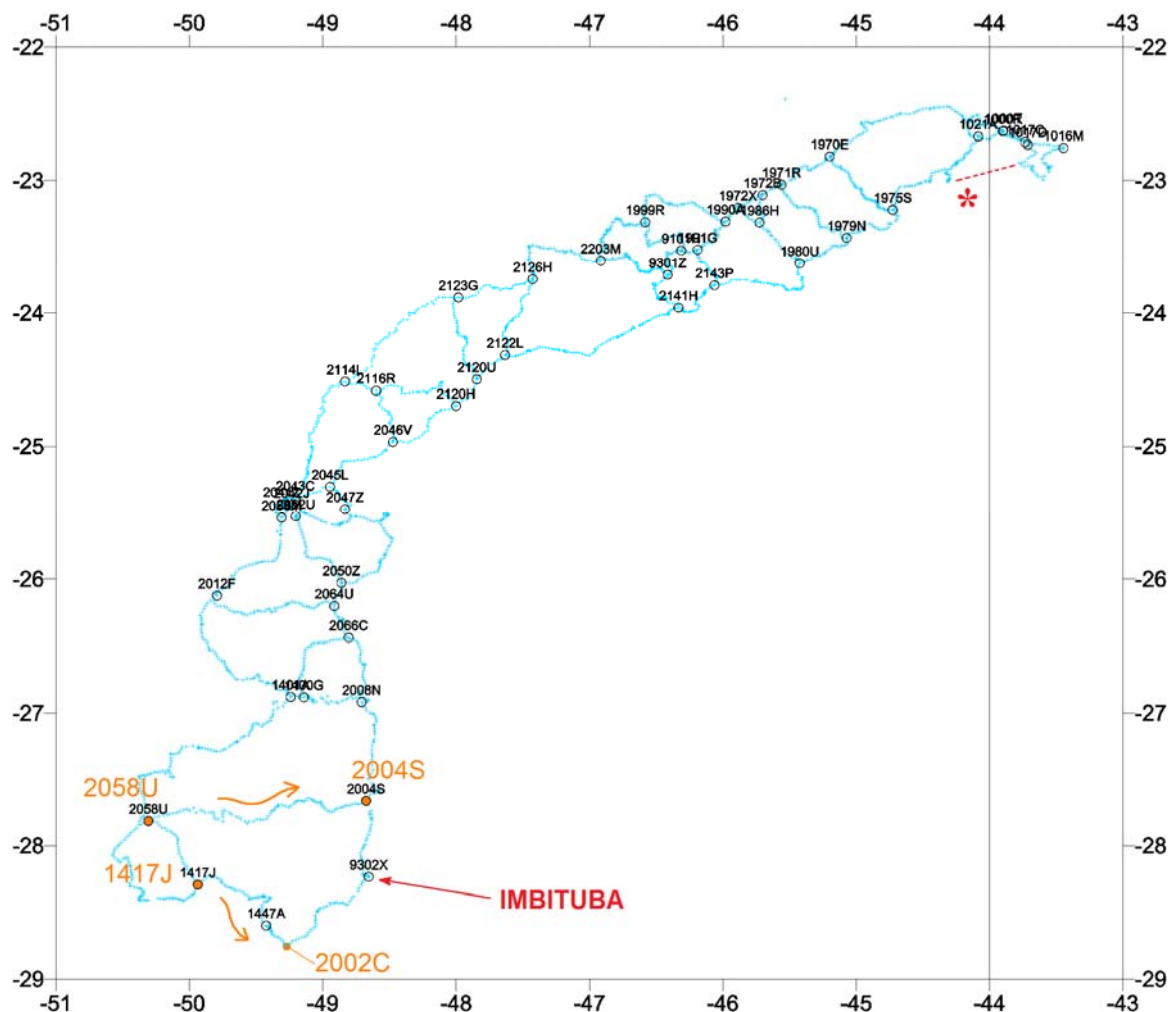


FIGURA 85 – SUB-REDE DE CIRCUITOS LITORÂNEOS ENTRE IMBITUBA E RIO DE JANEIRO

NOTA: resultados da montagem semi-automática da rede por IDNOS: RRNN nodais (círculos pretos) e linhas internodais (pontilhados azuis). O meridiano de 44° W é mostrado como referência para a consulta à Figura 84, na qual podem ser observadas as linhas não incluídas nesta sub-rede Imbituba-Rio – como a assinalada com pontilhado vermelho, rejeitada no processo de montagem com IDNOS. As linhas assinaladas no circuito de Imbituba (2058U-2004S e 1417J-2002C) têm alguns detalhes apresentados na Figura 87.

A fim de viabilizar o uso do programa IDNOS – o qual faz a integração de valores de gravidade, além da montagem da rede –, foram utilizados os valores decorrentes da interpolação experimental de gravidade para toda a RAAP, como descrito na seção 4.4.3.

Continuando com a aplicação do processo descrito na seção 4.3, os desníveis dinâmicos internodais da sub-rede litorânea Imbituba-Rio foram ajustados, obtendo-se as altitudes dinâmicas das RRNN nodais mostradas na Figura 85. Em seguida, foram calculadas suas altitudes normais, normais-ortométricas e de Helmert. A Tabela 14 e a Figura 86 mostram as diferenças entre elas.

TABELA 14 – DIFERENÇAS ENTRE ALTITUDES DA SUB-REDE IMBITUBA-RIO

| RN nodal | Alt. normal- ortométrica (m) | Dif. dinâmica -- normal-ortométrica (mm) | Dif. normal -- normal-ortométrica (mm) | Dif. helmert -- normal-ortométrica (mm) |
|----------|---------------------------------|--|--|---|
| 2141H | 3,2146 | -6,7 | -6,3 | -6,2 |
| 2143P | 4,2797 | -6,4 | -5,8 | -5,6 |
| 2008N | 5,3658 | -3,4 | -3,9 | -3,7 |
| 2004S | 5,4518 | -2,1 | -2,9 | -2,7 |
| 9302X | 6,5553 | 0,0 | -1,3 | -1,1 |
| 1980U | 6,9370 | -9,3 | -8,3 | -7,9 |
| 1975S | 7,6132 | -10,7 | -9,4 | -9,0 |
| 1979N | 8,5437 | -10,8 | -9,5 | -9,1 |
| 2047Z | 13,4500 | -12,4 | -12,2 | -11,8 |
| 2066C | 19,4216 | -4,3 | -5,4 | -4,7 |
| 2120U | 22,5891 | -3,8 | -1,9 | -1,1 |
| 2120H | 25,8034 | -5,1 | -3,3 | -2,7 |
| 2064U | 26,6861 | -5,5 | -6,5 | -5,6 |
| 1016M | 27,4656 | -16,9 | -11,3 | -10,2 |
| 1400G | 27,5441 | -2,1 | -4,5 | -3,3 |
| 2122L | 34,5190 | -5,5 | -2,1 | -0,4 |
| 1017D | 38,3764 | -19,7 | -11,8 | -10,3 |
| 2050Z | 43,3616 | -5,4 | -6,3 | -4,5 |
| 1017C | 63,1168 | -25,9 | -12,6 | -9,8 |
| 1401A | 68,9557 | -0,3 | -5,8 | -2,8 |
| 2116R | 93,9835 | -11,3 | -2,9 | 2,5 |
| 1447A | 112,0699 | 18,4 | -4,4 | 3,3 |
| 1000R | 370,0091 | -116,8 | -18,8 | -0,2 |
| 1000T | 372,1660 | -117,6 | -18,8 | 0,1 |
| 1021A | 467,8637 | -149,9 | -19,9 | 7,6 |
| 1970E | 536,9562 | -167,7 | -17,9 | 27,7 |
| 1990A | 572,3597 | -164,0 | -19,8 | 17,6 |
| 1972B | 572,8600 | -171,0 | -19,0 | 27,7 |
| 1972X | 580,8512 | -170,7 | -19,5 | 25,6 |
| 1971R | 586,2109 | -178,8 | -18,9 | 35,5 |
| 2123G | 661,1961 | -172,5 | -22,3 | 36,6 |
| 1986H | 684,7962 | -204,3 | -19,9 | 29,9 |
| 9101H | 737,9560 | -213,3 | -18,9 | 30,6 |
| 2046V | 741,6826 | -125,5 | -3,4 | 33,2 |
| 1991G | 749,1607 | -217,9 | -19,0 | 33,8 |
| 1999R | 754,0297 | -230,1 | -18,7 | 35,7 |
| 9301Z | 771,4441 | -215,3 | -17,6 | 28,9 |
| 2012F | 788,4170 | -67,4 | 2,8 | 59,8 |
| 2203M | 828,8619 | -244,4 | -18,5 | 47,1 |
| 2045L | 843,5949 | -134,4 | -2,1 | 31,4 |
| 2058U | 893,9295 | 2,4 | -15,8 | 67,4 |
| 2052U | 897,2918 | -132,3 | 1,7 | 40,2 |
| 2041Z | 910,6136 | -141,6 | 2,2 | 41,3 |
| 2043C | 921,8699 | -147,6 | 2,8 | 41,8 |
| 2042J | 926,1398 | -144,8 | 3,3 | 45,0 |
| 2053M | 929,6676 | -139,2 | 3,7 | 49,5 |
| 2126H | 965,2634 | -296,1 | -21,4 | 62,0 |
| 1417J | 1345,1470 | -16,4 | 2,7 | 105,6 |

NOTA: dados ordenados pelos valores de altitude (normal-ortométrica). São assinalados os percentis de 10% (azul) e 90% (amarelo) de cada conjunto de diferenças, sendo os valores máximos e mínimos indicados em tom mais intenso e em negrito.

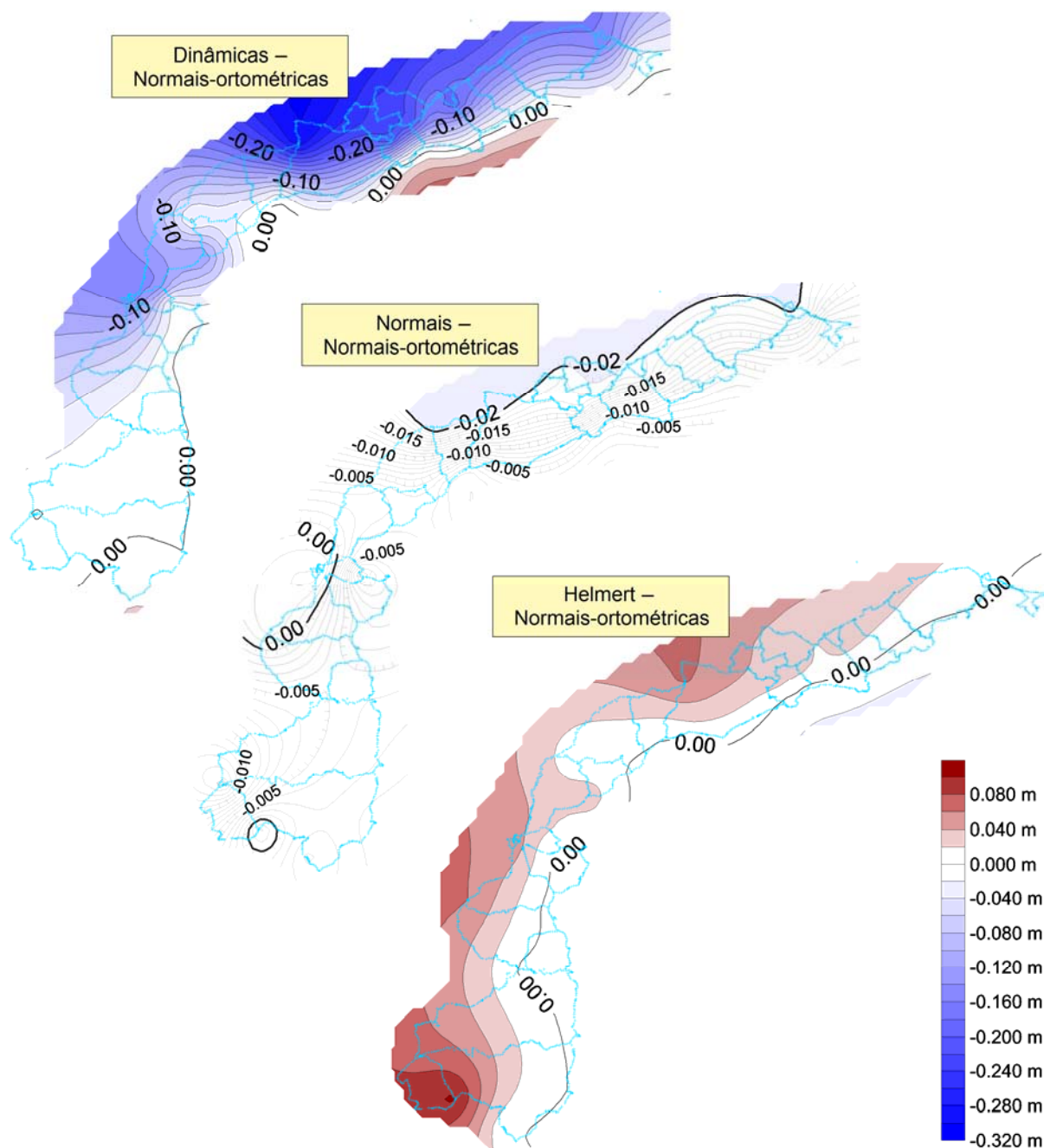


FIGURA 86 – DIFERENÇAS ENTRE AS ALTITUDES NORMAIS-ORTOMÉTRICAS E AS ALTITUDES FÍSICAS DA SUB-REDE IMBITUBA-RIO

NOTA: intervalo das isolinhas: 0,02 m. A fim de permitir a comparação entre os diferentes conjuntos de diferenças, foi utilizada uma única escala de cores. Em função da pequena variação das diferenças referentes às altitudes normais (de $-0,0223$ m a $+0,0037$ m, conforme Tabela 14), foram incluídas curvas intermediárias no respectivo mapa de isolinhas, com intervalo de 0,001 m, entre $-0,020$ m e $+0,003$ m.

As altitudes normais-ortométricas foram escolhidas como referência para o cálculo das diferenças em função de serem o tipo de altitudes atualmente adotado no SGB. Tal escolha permite avaliar o impacto da adoção daqueles tipos de altitude

física nos resultados da sub-rede Imbituba-Rio. Observa-se que as diferenças se mantêm abaixo de 2 cm para as regiões de pequenas altitudes, para todos os tipos de altitude física. As altitudes dinâmicas são responsáveis pelas maiores diferenças (até -30 cm), nas áreas de maiores altitudes mais distantes da região de adequação do valor utilizado para a gravidade de referência ($9,79 \text{ m/s}^2$), o circuito de Imbituba. As altitudes de Helmert mostram tendência inversa, com uma diferença máxima de +10 cm no próprio circuito de Imbituba. Sob o ponto de vista do impacto da eventual adoção de um ou outro tipo de altitude física, os resultados referentes a esta limitada sub-rede da RAAP indicam que as altitudes normais constituem a alternativa mais favorável. Entretanto, é essencial que esta conclusão preliminar seja validada com a extensão desse tipo de teste a uma porção mais representativa da RAAP e com a adequada análise dos resultados da respectiva interpolação de gravidade.

Além disso, os testes aqui discutidos basearam-se na comparação das altitudes das RRNN nodais. O cálculo das altitudes das RRNN intermediárias pode revelar situações mais desfavoráveis – como aquelas mostradas nos gráficos da Figura 87, que apresentam as correções normais e de Helmert acumuladas para os desníveis intermediários das linhas assinaladas na Figura 85. Observa-se que existem variações intermediárias das correções que não se refletem nos valores internodais (Figura 86). Assim, testes mais representativos deverão necessariamente contemplar todas as RRNN das respectivas redes, e não apenas as RRNN nodais.

Não foi possível concluir a montagem da rede até Macaé e Salvador, em função da complexidade decorrente da heterogeneidade temporal. No entanto, o cálculo e ajustamento das diferenças de geopotencial para a rede Imbituba-Rio permitiu ilustrar os efeitos da integração da gravidade em circuitos com grande variação vertical – como o próprio circuito de Imbituba (Figura 1). Mesmo com a incerteza nos valores de gravidade utilizados, os gráficos apresentados na Figura 87 corroboram a necessidade de que os estudos apresentados nesta Tese sejam continuados e integrados. Isso proporcionaria uma base mais sólida para a integração da RAAP ao SVSIRGAS e, conseqüentemente, para a compatibilização das altitudes do SGB em relação ao(s) futuro(s) SRVG.

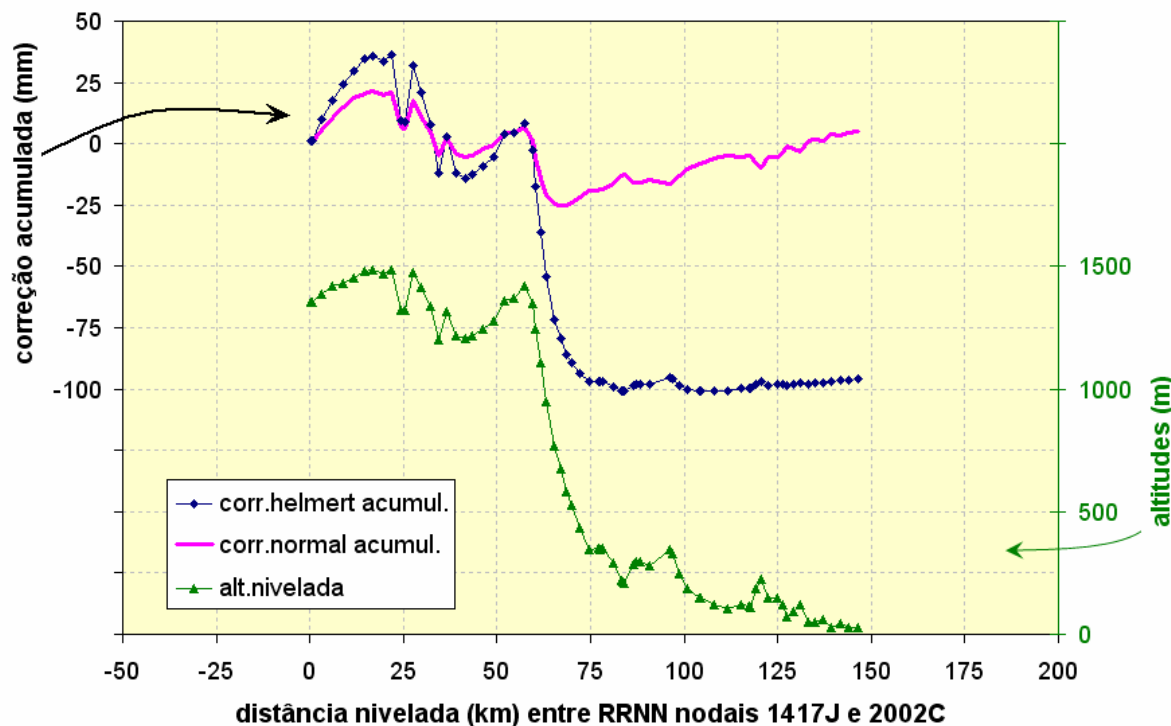
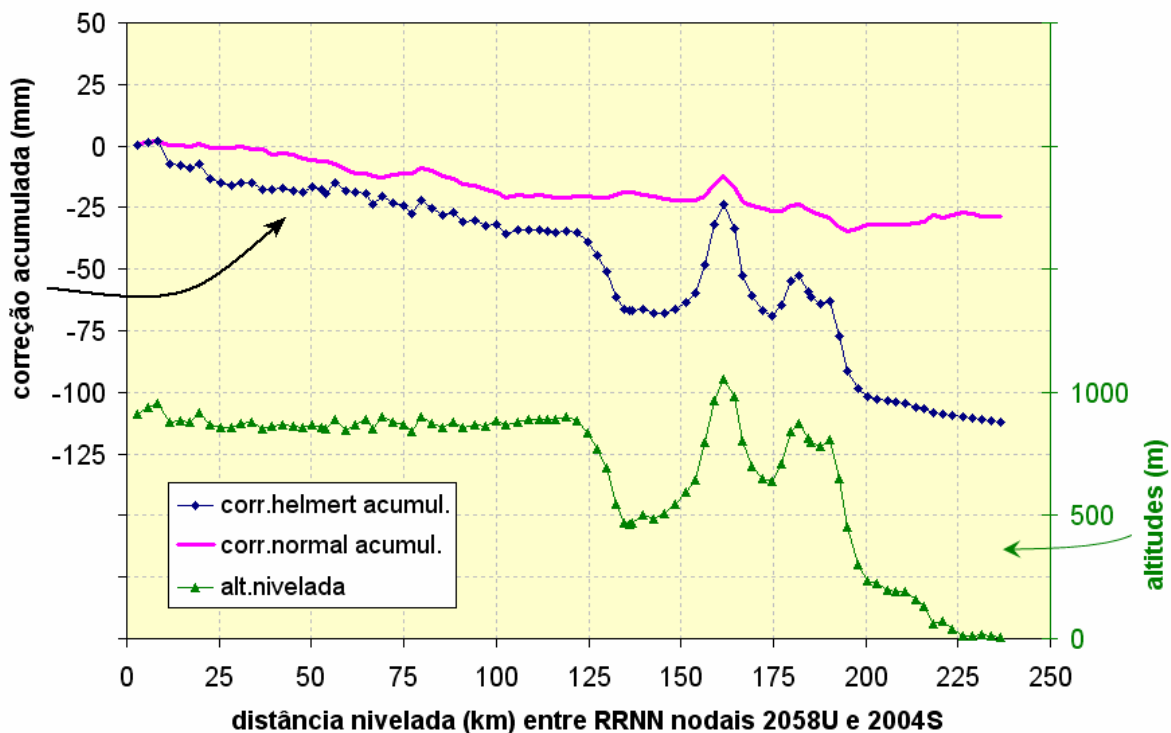


FIGURA 87 – VARIAÇÃO DAS ALTITUDES E CORREÇÕES DE GRAVIDADE NOS DESNÍVEIS DE DUAS LINHAS DO CIRCUITO DE IMBITUBA

NOTA: altitudes no eixo esquerdo

7. CONCLUSÕES

A integração do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) ao Sistema Vertical SIRGAS (SVSIRGAS) está sujeita a algumas dificuldades específicas: a maioria das estações gravimétricas (EEGG) não tem vínculo com as referências de nível (RRNN) da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do SGB; as poucas RRNN coincidentes com EEGG ressentem-se da desvinculação das respectivas bases de dados, existindo algumas sérias inconsistências entre elas; e a impossibilidade de vinculação direta das altitudes da sub-rede da RAAP no Amapá, referidas ao Datum Vertical Brasileiro em Santana (DVB-S), ao restante das RRNN do SGB, cujas altitudes são referidas ao DVB-I (Imbituba).

Os arquivos de dados de gravimetria e nivelamento do IBGE, obtidos a partir do seu Banco de Dados Geodésicos (BDG), foram analisados sob o ponto de vista das dificuldades de utilização de suas informações para o cálculo das diferenças de geopotencial entre as RRNN da RAAP. Foi identificada uma região em que praticamente todas as RRNN foram niveladas no início da década de 1990 e dispõem de informação gravimétrica direta e homogênea. A integração das respectivas informações de gravidade aos dados de nivelamento e a montagem da rede de diferenças internodais de geopotencial foi realizada com auxílio do programa computacional IDNOS, desenvolvido especificamente para isso.

Com as informações desta rede, foi possível simular diferentes cenários de ausência de dados de gravidade em RRNN, avaliando os valores interpolados via colocação por mínimos quadrados pelo programa computacional PREDGRAV, fornecido pelo Grupo de Trabalho "Datum Vertical" (GT-III) do Projeto SIRGAS. Os testes preliminares indicaram que os desvios-padrão fornecidos pelo PREDGRAV superestimam a qualidade da interpolação, principalmente nos casos de distribuição desfavorável dos valores de referência – como acontece, por exemplo, ao se considerar apenas as EEGG do IBGE. No entanto, não foi possível analisar os detalhes da formação das funções covariância, que poderiam subsidiar uma qualificação mais adequada dos valores de gravidade interpolada.

Além disso, as inconsistências entre as informações posicionais contidas nos arquivos de RRNN e EEGG, do IBGE, não puderam ser totalmente sanadas. Em muitos casos, as coordenadas horizontais das RRNN têm confiabilidade pior que 1 minuto de arco, em função de terem sido locadas e extraídas de cartas desatualizadas e de escala inadequada. As coordenadas da maioria das EEGG, pelo contrário, foram obtidas com navegadores GPS, levando a precisões da ordem de poucos segundos de arco, ou por volta de 100 m. Enquanto as coordenadas horizontais revelaram-se melhores no arquivo de EEGG, freqüentemente as altitudes nele existentes apresentaram valores truncados, em relação aos valores teoricamente “corretos” do arquivo de RRNN.

Por outro lado, a distribuição desfavorável de EEGG do IBGE sobre alguns trechos da RAAP poderia ser compensada com EEGG de outras instituições. A fim de verificar a viabilidade de utilização desse tipo de informação, foi obtida a base de dados da Sub-Comissão de Gravidade e Geóide na América do Sul (SCGGSA) da Associação Internacional de Geodésia (IAG). Uma inspeção inicial do arquivo recebido revelou a inexistência de identificação de suas EEGG, o que inviabilizou a utilização direta dos dados. Foi feito um ensaio de seleção de possíveis coincidências, com base nas coordenadas e altitudes existentes nesse arquivo e no BDG do IBGE. Entretanto, não foi possível eleger um conjunto mínimo de coincidências inequívocas, que permitisse a avaliação dos demais pontos mediante a interpolação de valores de gravidade, com PREDGRAV, e sua comparação com os valores existentes no arquivo.

Foi discutida a influência da heterogeneidade espacial e temporal na formação da rede de linhas internodais a ser ajustada após a integração de informação gravimétrica às seções de nivelamento. Para tanto, foram analisados os efeitos do particionamento adotado no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (AAGP) da RAAP, através do qual o IBGE calculou as altitudes existentes atualmente no BDG. Em tal análise foi utilizado o programa AJNIVOCT, desenvolvido em ambiente de computação científica “Octave” com a mesma formulação matemática básica utilizada no AAGP – inclusive a aplicação da correção normal-ortométrica para minimização dos efeitos da não integração de gravidade. A rede particionada no AAGP, composta por macro-circuitos e respectivas sub-redes internas, foi re-integrada e ajustada com o AJNIVOCT, sob a

forma da rede denominada LPLI1, com 1054 desníveis internodais e 741 RRNN nodais. O ajustamento de LPLI1 evidenciou distorções excessivas nos valores de altitude calculados no AAGP, com uma amplitude máxima maior que 30 cm. Em seguida, foi corrigido um problema de 12 cm decorrente da heterogeneidade da RAAP nas imediações de Imbituba, que resultou em diferenças aproximadas de 2,5 cm na maior parte da RAAP. Não foi possível prosseguir tais análises considerando outros efeitos – como a correção de algumas heterogeneidades espaciais mediante a inclusão dos blocos de linhas niveladas após a conclusão do AAGP.

Contudo, mesmo essa avaliação parcial do AAGP forneceu subsídios para o início da montagem de uma sub-rede da RAAP conectando três estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) – Imbituba, Macaé e Salvador. Seu objetivo é estabelecer uma base para o estudo dos efeitos da topografia do nível médio do mar (TNMM) via integração de informações derivadas da Altimetria por Satélites (ALTSAT). Por sua vez, a integração dos resultados das missões de ALTSAT é essencial ao vínculo do DVB-S ao DVB-I.

As alturas da superfície do mar (SSH) observadas com os satélites altimétricos organizam-se segundo trilhas, definindo uma “rede” de perfis que, em alguns casos, não propicia uma amostragem adequada da área de estudo. Este não é o caso daquelas estações da RMPG – foi possível definir uma configuração em que as trilhas dos satélites altimétricos mais recentes são praticamente colineares às estações de Imbituba, Macaé e Salvador. De forma a homogeneizar os níveis de referência implícitos nas observações dessas trilhas conectoras, foram escolhidas trilhas de referência em oceano aberto, longe das áreas de pequena profundidade em que as observações de ALTSAT mostram degradação de qualidade. Além disso, o entorno da estação da RMPG em Salvador foi escolhido como área de testes para integração de dados da RMPG e de ALTSAT, em função da pequena largura da plataforma continental na região e da quase inexistência de perturbações meteorológicas. Ambas condições contribuiriam para a menor incidência de distorções das observações de ALTSAT, incrementando sua disponibilidade a uma distância da costa menor que a obtida em outras situações.

Foram analisados os dados de ALTSAT reorganizados e distribuídos pelo Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas (DGFI), com o objetivo inicial de investigar as alternativas de filtragem da variabilidade da SSH nos curtos comprimentos de onda. Tal filtragem é essencial para a combinação dos perfis de SSH às respectivas alturas geoidais – extraídas de um dos modelos mais recentes do geopotencial, como o EIGEN-GL04C –, a fim de se obter estimativas da TNMM. Posteriormente, foi analisada a solução global de TNMM do DGFI, resultado da suavização dos perfis de SSH (missões T/P-EM e Jason-1) e de altura geoidal (modelo EIGEN-GL04C) mediante aplicação de um mesmo filtro com abrangência espacial de 250 km. Esta análise restringiu-se à porção oeste do Atlântico Sul, diretamente envolvida na conexão oceânica das estações maregráficas mencionadas. As estimativas da TNMM ao longo das trilhas conectoras dos marégrafos mostraram inconsistências de até 30 cm em relação às obtidas nas trilhas de referência, levando à necessidade de ampliação da configuração inicial de trilhas. A região de estudo foi expandida, tanto considerando novas trilhas de referência em direção a áreas mais profundas a leste, como incluindo as trilhas intermediárias transversais à costa, paralelamente às trilhas conectoras dos marégrafos, o que levou à ampliação do número de cruzamentos analisados, inicialmente de 17 para 134, chegando posteriormente a 288.

Com essa rede adensada de cruzamentos, foi detectada uma concentração daquelas inconsistências no entorno do platô de Abrolhos, onde a plataforma continental brasileira apresenta um grande alargamento. Estas inconsistências foram interpretadas como possível efeito residual daquele platô, propagado para os cruzamentos vizinhos durante a filtragem. Concluiu-se que, no caso de estudos no entorno de águas rasas, a definição da abrangência espacial da filtragem de SSH deve também considerar esta restrição. Entretanto, é necessário investigar a existência de tais inconsistências mesmo nos arquivos regulares de SSH da base de dados do DGFI, eventualmente resultante da propagação dos efeitos de águas rasas durante o processo de ajustamento dos cruzamentos das trilhas. Outra hipótese levantada para explicar aqueles problemas sugere que as trilhas conectoras dos marégrafos apresentem efeitos anômalos em decorrência da transição terra-água. Esta hipótese também não pôde ser avaliada, em função da abrangência limitada da área de estudos, mas poderia ser mais explorada com a inclusão de dados da

missão Envisat, cuja configuração (órbita retrógrada) evita a ocorrência daquele tipo de transição no litoral sul-sudeste brasileiro.

As observações digitais das estações da RMPG em Imbituba, Macaé e Salvador foram inteiramente analisadas, detectando-se algumas inconsistências e lacunas localizadas. A conclusão do tratamento dos registros gráficos, em andamento no IBGE, permitirá o preenchimento das lacunas. As informações de controle geodésico foram analisadas apenas para Imbituba, o que impediu a integração das observações maregráficas à RAAP. Da mesma forma, as observações maregráficas não puderam ser reduzidas com o mesmo modelo de marés aplicado às informações altimétricas do DGFI, impedindo a integração entre elas.

Apesar da impossibilidade de integração de informações da RMPG e de ALTSAT, a montagem da sub-rede de nivelamento entre Imbituba e Salvador foi iniciada. Para tanto, foram utilizados valores de gravidade obtidos na interpolação exploratória com os dados recebidos da SCGGSA – ou seja, ignorando-se os problemas dessa base de dados. Foi possível calcular números geopotenciais e respectivas altitudes físicas para as RRNN dos circuitos litorâneos entre Imbituba e Rio de Janeiro, que, por incluírem as escarpas da Serra do Mar, apresentam grande variação vertical.

A comparação das altitudes físicas (dinâmicas, normais, normais-ortométricas, e de Helmert) das 48 RRNN nodais da sub-rede Imbituba-Rio evidenciou a maior adequação das altitudes normais, cujas diferenças em relação às altitudes normais-ortométricas situaram-se entre $-22,3$ mm e $+3,7$ mm. Para as altitudes dinâmicas, essas diferenças variaram de $-296,1$ mm a $+18,4$ mm, refletindo a inadequação do valor da gravidade de referência. E, para as altitudes de Helmert, entre $-11,8$ mm e $+105,6$ mm.

Não se pôde alcançar o objetivo inicial de aplicar os procedimentos de integração ao problema da conexão entre os referenciais verticais de Imbituba e Santana, mas o planejamento de novos levantamentos geodésicos, por parte das instituições pertinentes, propiciará a necessária disponibilidade de dados.

Assim, os estudos desenvolvidos ao longo desta Tese permitiram definir procedimentos de crítica e integração de dados de nivelamento geométrico,

gravimetria, estações maregráficas e altimetria por satélites. Esses procedimentos foram materializados sob a forma de programas computacionais, desenvolvidos em Fortran e Octave, levando em consideração as especificidades do contexto brasileiro. Cabe enfatizar a importância da montagem semi-automática da rede de diferenças de geopotencial internodais, implementada no programa IDNOS, em vista do grande volume de dados de nivelamento e gravimetria associados à RAAP. A deficiência de dados abrangendo todo o Território Brasileiro foi contornada com a definição de áreas selecionadas, em que diferentes arranjos parciais daquelas informações mostraram distribuição ideal.

Com isso, pode-se afirmar que importantes passos foram dados em direção ao aprimoramento das altitudes do Sistema Geodésico Brasileiro. Com os procedimentos estabelecidos nesta Tese, e algum esforço multi-institucional visando à complementação das redes de nivelamento, gravimetria e GPS, pode ser esperada para breve uma nova realização da componente vertical do SGB – a primeira com significado físico inequívoco, graças à integração de gravidade ao nivelamento. Conseqüentemente, o País obterá uma estrutura de referência significativamente mais adequada para o posicionamento vertical de precisão, implicando na otimização e no aumento da eficiência dos levantamentos altimétricos conduzidos no Território Brasileiro.

8. RECOMENDAÇÕES

É necessário que as bases de dados de referências de nível (RRNN) e estações gravimétricas (EEGG) do IBGE sejam submetidas a um processo de compatibilização, no qual sejam não apenas eliminadas as inconsistências entre os valores referentes às mesmas grandezas, mas também os próprios formatos de codificação sejam unificados. Tal compatibilização deve se estender aos arquivos de processamento e respectivos sistemas.

A base de dados da Sub-Comissão de Gravidade e Geóide na América do Sul (SCGGSA) da Associação Internacional de Geodésia (IAG) deve ser complementada com informações que possibilitem sua utilização no cálculo de diferenças de geopotencial e na validação de outras informações da própria base. Tais informações devem ser obtidas junto às próprias instituições produtoras, que possivelmente já implementaram algumas das necessárias conversões de referencial. Esta consideração leva à recomendação de que sejam implementados procedimentos de atualização ou validação periódica das informações na base de dados da SCGGSA. Por outro lado, é conveniente discutir o papel do Banco de Dados Gravimétricos (BDGrav) do IBGE nesse contexto.

É necessário submeter a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) a um processo de homogeneização temporal e espacial. Para tanto, é conveniente definir um conjunto de linhas recentes que, mediante complementação com um mínimo de novos levantamentos, possam formar uma sub-rede que concentre as atividades de densificação gravimétrica e posicionamento geocêntrico. Tal sub-rede constituiria a base para vinculação da RAAP ao Sistema Vertical SIRGAS (SVSIRGAS) e para seus futuros reajustamentos.

É necessário incluir informações de controle geodésico das estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) no contexto de distribuição das respectivas observações de nível do mar. Estas, por sua vez, devem ser complementadas com os dados provenientes do tratamento dos registros gráficos. É

necessário identificar a disponibilidade de modelos hidrodinâmicos que possibilitem a análise das feições locais da topografia do nível médio do mar (TNMM) e o refinamento dos resultados dos modelos globais de maré utilizados na correção das observações de Altimetria por Satélites (ALTSAT). Juntamente com a referência elipsoidal dada pelas observações das estações GNSS contínuas (“CGPS”), esses conhecimentos servirão para aprimorar o vínculo entre as observações da RMPG e de ALTSAT. Para tanto, as altitudes elipsoidais das estações CGPS devem ser compatibilizadas aos resultados das demais técnicas e modelos geodésicos, em relação ao tratamento da maré permanente.

A filtragem local dos perfis de informações de ALTSAT, provenientes da base de dados do Instituto Alemão de Pesquisas Geodésicas (DGFI), deve ser concluída de forma a permitir a obtenção de estimativas da TNMM na área do Oceano Atlântico pertinente à integração das estações da RMPG. Devem ser consideradas não somente aquelas estações tratadas nesta Tese – Salvador, Macaé e Imbituba –, mas também as estações envolvidas na conexão entre os referenciais verticais de Imbituba e Santana. A fim de que os resultados dessa filtragem sejam comparados com a solução global de TNMM do DGFI, a rede de trilhas de ALTSAT selecionadas nesta Tese deve ser expandida na direção norte, de modo a abranger todo o litoral brasileiro. A análise dessas estimativas de TNMM deve incluir eventuais sazonalidades e tendências, além da possibilidade de que estes efeitos venham a ser utilizados para o refinamento das correções às próprias observações de nível do mar (SSH) que originaram as estimativas de TNMM.

Os programas computacionais desenvolvidos nesta Tese devem passar por um processo de generalização, integração e documentação, que permita sua utilização por parte da comunidade envolvida nas atividades do Grupo de Trabalho “Datum Vertical” (GT-III) do Projeto SIRGAS. O programa de predição via colocação por mínimos quadrados do pacote de rotinas da “Escola do Geóide” deve ser adaptado de forma a produzir resultados compatíveis com o programa distribuído pelo GT-III, além de estender as possibilidades de avaliação da interpolação de valores de gravidade. Deve ser analisada a possibilidade de refinamento dos resultados da interpolação de gravidade mediante a obtenção de funções covariância das anomalias gravimétricas segundo a abrangência das respectivas províncias geológicas.

Finalmente, é necessário o desenvolvimento de ações que reflitam o reconhecimento de que, no futuro, o posicionamento vertical de precisão dependerá não apenas dos GNSS, mas também de modelos aprimorados do geopotencial. O grau de aprimoramento dos futuros modelos sobre o Território Brasileiro dependerá de uma cada vez maior disponibilidade de resultados de GNSS e gravimetria sobre a Rede Altimétrica de Alta Precisão do SGB. Obviamente, o sucesso de tais determinações será proporcional à importância que se dê à preservação de suas Referências de Nível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. **Aquífero Guarani: Educação Ambiental para a sua preservação na região do Planalto dos Guimarães.** R. B. Migliorini, U. Duarte, M. A. P. Barros Neta (Org.). Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2006. 80 p. Disponível em: <<http://www.sg-guarani.org/microsite/pages/pt/materiales.php>>, acesso: 04/02/2008.

ALENCAR, J. C. M. Sistema Nacional de Nivelamento de 1a Ordem. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE GEOCIÊNCIAS, 1., 1968, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBGE, 1968. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtm>, acesso: 12/05/2005.

ALENCAR, J. C. M. Experiência do IBGE nas Travessias de Rios com Nivelamento de Precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 10., 1981, Brasília. **Anais...** Brasília: SBC, 1981. p. 461-489. v. 2.

ALENCAR, J. C. M. Ajustamentos da Rede de Nivelamento de 1a. Ordem. Comunicação Interna, IBGE. 1988.

ALENCAR, J. C. M. Datum Altimétrico Brasileiro. **Cadernos de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 5, p. 69-73, 1990. Também disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtm>, acesso: 12/05/2005.

ALLISTER, N. A.; FEATHERSTONE, W. E. Estimation of Helmert orthometric heights using digital barcode levelling, observed gravity and topographic mass-density data over part of the Darling Scarp, Western Australia. **Geomatics Research Australasia**, Canberra, v. 75, p. 25-52, 2001. Também disponível em: <<http://www.cage.curtin.edu.au/~geogrp/pubs.html>> Acesso em: 28/10/2005.

AMOS, M. J.; FEATHERSTONE, W. E. Unification of Height Systems in New Zealand. In: DYNAMIC PLANET 2005, IAG-IAPSO-IABO JOINT ASSEMBLY, 2005, Cairns. **Program & Abstract Book**. Cairns: IAG, 2005. p. 237. Resumo e poster.

AMOS, M. J.; FEATHERSTONE, W. E.; BLICK, G. H. Progress towards implementation and development of a New Zealand national vertical datum. In: SANSO, F. (Ed.). **A Window on the Future of Geodesy**. Berlin: Springer, 2005. p. 338-343. xvii, 619 p. (IAG Symposia, v. 128).

ANDERSEN, O. B. **Marine Gravity and Geoid from Multi-Satellite Altimetry and Applications** – lecture notes for International Workshop on Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography. September 8-13, 2002, Wuhan, China. National Survey and Cadastre (KMS) , Denmark. 2002.

ARABELOS, D.; TSCHERNING, C. C. Improvements in height datum transfer expected from the GOCE mission. **Journal of Geodesy**, v. 75, n. 5-6, p. 308-312, 2001.

BESERRA, H. **Instruções para Nivelamentos de Precisão**. Rio de Janeiro: CNG, 1948. vii, 29 p. (Biblioteca Geográfica Brasileira, Série C, n. 4).

BESERRA, H. **Ajustamento da Rede de Nivelamento**. Rio de Janeiro: CNG, 1952. (Biblioteca Geográfica Brasileira, Série B, n. 11). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtm>, acesso: 12/05/2005.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Orgs.) **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil : texto, mapas & SIG**. Brasília : CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p. ISBN 85-230-0790. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=790&sid=9>>, acesso em: 24/09/2007.

BLANCO LLERENA, D.; FAURE VALBI, J.; PEREZ RODINO, R. Determinaciones Altimétricas vinculadas a los sistemas nacionales utilizando receptores GPS en la frontera Uruguay-Brasil. 2006. Apresentado no Simposio Internacional “Sistemas Altimétricos, Gravedad y Geóide en Sud America”, 25-29/09/2006, Buenos Aires, Argentina. Disponível em: <<http://www.fing.edu.uy/ia/deptogeo/proyectos/proyectos.htm>>, acesso em: 14/02/2008.

BLITZKOW, D.; FORTES, L. P. S.; GODOY, R. A. Z. Geoidal map improvement in Brazil. In: SÜNKEL, H.; BAKER, T. (Ed.). **Sea Surface Topography and the Geoid**. New York: Springer, 1990. p. 73-79. x, 187 p. (IAG Symposia, v. 104).

BLITZKOW, D. Relatório – Sub-Comissão do Geóide para América do Sul. **Bulletin [of the] International Geoid Service**, Milano, n. 9: Special Issue for South America, p. 1-5, 1999. 4, 141 p.

BLITZKOW, D.; CANCORO DE MATOS, A. C.; LOBIANCO, M. C. B. Data Collecting and Processing for Quasi-Geoid Determination in Brazil. In: DREWES, H. et al. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. Berlin: Springer, 2002. p. 148-151. x, 353 p. (IAG Symposia, v. 124).

BOMFORD, G. **Geodesy**. 4. ed., reprinted (with corrections). Oxford: Clarendon Press, 1983. xii, 855 p.

BOSCH, W. The Sea Surface Topography and its Impact to Global Height System Definition. In: DREWES, H. et al. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. Berlin: Springer, 2002. p. 225-230. x, 353 p. (IAG Symposia, v. 124).

BOSCH, W. Discrete Crossover Analysis. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. (Ed.) **Dynamic Planet**. Berlin: Springer, 2006a. p. 131-136. xxvi, 909 p. (IAG Symposia, v. 130).

BOSCH, W. Mean Sea Surfaces – Determination and Calibration. Oral presentation at IC-P 1.2 Workshop, 10-11 April, 2006b, Prague.

BOSCH, W.; SAVCENKO, R. Satellite Altimetry: Multi-Mission Cross Calibration. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. (Ed.) **Dynamic Planet**. Berlin: Springer, 2006. p. 51-56. xxvi, 909 p. (IAG Symposia, v. 130).

BOSCH, W.; SAVCENKO, R. Estimating the sea surface topography – profile approach with error examination. In: IAG Inter-Association Symposia, Excerpt of “Earth, Our Changing Planet – IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007. **Proceedings...** Perugia: Umbria Scientific Meeting Association, 2007. p. 14. Disponível em: <<http://www.iugg2007perugia.it/webbook/pdf/JG.pdf>>, acesso em: 10/02/2008.

BOSCH, W.; FENOGLIO-MARC, L.; WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M.; NOVOTNY, K.; SAVCENKO, R.; KARPYTCHEV M.; NICOLLE, A.; BECKER, M.; LIEBSCH, G.

Coastal Sea Surface Topography – a Synthesis of Altimetry, Gravity, and Tide Gauges. In: Aviso Newsletter, n. 11, Toulouse: CNES, 2008, in press. Disponível em: <<http://www.dgfi.badw.de/dgfi/DOC/2006/OST-SciencePlan-bosch2.pdf>>, acesso em: 11/05/2007.

BOWIE, W; AVERS, H. G. Fourth General Adjustment of the Precise Level Net in the United States and the Resulting Standard Elevations. Special Publication No. 18, Washington: U. S. Coast and Geodetic Survey, 328 p. 1914. Disponível em: http://docs.lib.noaa.gov/rescue/cgs_specpubs/>, acesso: 05/02/2008.

BURSA, M.; KENYON, S.; KOUBA, J.; SÍMA, Z.; VATRT, V.; VOJTÍSKOVÁ, M. A Global Vertical Reference Frame based on Four Regional Vertical Datums. **Studia Geophysica et Geodaetica**, Praha, v. 48, n. 3, p. 493-502, 2004.

BURSA et al. Presentation at the I-CP 1.2 Meeting held at the 1st Symposium of the International Gravity Field Service (IGFS2006), Istanbul, Türkiye, Sept. 2006.

BURSA, M.; KENYON, S.; KOUBA, J.; SÍMA, Z.; VATRT, V.; VOJTECH, V.; VOJTÍSKOVÁ, M. The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system. **Journal of Geodesy**, v. 81, n. 2, p. 103-110, 2007.

CALDWELL, P.; KILONSKY, B. Data processing and quality control at the TOGA Sea Level Center. In: **Joint IAPSO-IOC Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control**, Paris, 12-13 October, 1992. IOC Workshop Report No. 81, UNESCO. p. 122-135. 1992.

CALDWELL, P. Sea Level Data Processing On IBM-PC Compatible Computers Version 3.0 (Year 2000 Compliant), 2001. JIMAR Contribution No. 98-319, SOEST, University of Hawaii Sea Level Center, 40 pp.

CASTRO JÚNIOR, C. A. C. **Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul**. São Paulo, 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Também disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27072007-150539/>>, acesso em: 07/02/2008.

CATALÃO, J. **Geodésia Física**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 2000. 87 p. Disponível em: <<http://www.igidl.ul.pt/download.htm>>, acesso em: 16/09/2007.

CC-GL-BHHD. **Establishment of International Great Lakes Datum (1985)**. Coordinating Committee on Great Lakes Basic Hydraulic and Hydrologic Data. 1995. Disponível em: <<http://www.lre.usace.army.mil/greatlakes/hh/links/ccglbhhd/committeepublications/>>, acesso em: 24/01/2008.

CHAMBERS, D. P.; HAYES, S. A.; RIES, J. C.; URBAN, T. J. New TOPEX sea state bias models and their effect on global mean sea level. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C10, 3305, doi:10.1029/2003JC001839, 2003.

CHELTON, D. B.; RIES, J. C.; HAINES, B. J.; FU, L.-L.; CALLAHAN, P. S. Satellite Altimetry. In: FU, L.-L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite Altimetry and Earth Sciences**. San Diego: Academic Press, 2001. p. 1-131. xii, 463 p.

CHEN, J. Global mass balance and the length-of-day variation. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. B08404, doi:10.1029/2004JB003474, 2005.

CLOSE, C. F.; JOLLY, H. L. P.; WOLFF, A. J. **The Second Geodetic Levelling of England and Wales, 1912-1921**. Ordnance Survey, 1921. Disponível em: <<http://www.deformedweb.co.uk/trigs/data/2GLMain.htm>>, acesso em: 04/02/2008.

CORDINI, J. **Estudo dos Aspectos Geodinâmicos no Datum da Rede Altimétrica do SGB**. Curitiba, 1998. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

COX, C. M.; CHAO, B. F. Detection of a Large-Scale Mass Redistribution in the Terrestrial System Since 1998. **Science**, v. 297, p. 831-833, 2002.

DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C. Estudos do NMM a partir de Séries Temporais Maregráficas e de Altimetria por Satélites visando a Integração da Rede Vertical Brasileira ao SIRGAS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 2, p. 140-153, 2005. Também disponível em: <<http://www2.prudente.unesp.br/rbc>> Acesso em: 03/11/2005.

DALAZOANA, R. **Estudos dirigidos a análise temporal do Datum Vertical Brasileiro**. Curitiba, 2005. xiv, 188 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Também disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/3922>>, acesso em: 28/09/2006.

DENG, X.; FEATHERSTONE, W. E. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia, **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. C06012, doi:10.1029/2005JC003039. 2006.

DGFI. BINs Documentation. 2007. Disponível em: <<http://www.dgfi.badw.de/BINs/DOCU/BINs-docu-main.php>>, acesso em: 21/12/2007.

DREWES, H. Experiences with least squares collocation as applied to interpolation of geodetic and geophysical quantities. XII Symposium on Mathematical Geophysics. Caracas. 1978.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L.; BLITZKOW, D.; FREITAS, S. R. C. Scientific Foundations of the SIRGAS Vertical Reference System. In: DREWES, H. et al. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. Berlin: Springer, 2002. p. 297-301. x, 353 p. (IAG Symposia, v. 124).

DREWES, H.; KANIUTH, K.; VÖLKSEN, C.; COSTA, S. M. A.; FORTES, L. P. S. Results of the SIRGAS Campaign 2000 and Coordinates Variations with Respect to the 1995 South American Geocentric Reference Frame. In: SANSÓ, F. (Ed.). **A Window on the Future of Geodesy**. Berlin: Springer, 2005. p. 32-37. xvii, 619 p. (IAG Symposia, v. 128).

DREWES, H.; ANGERMANN, D.; KRÜGEL, M.; MEISEL, B. On the ITRS Datum Specifications. IERS Conventions Workshop, Sèvres, 2007. Disponível em: <http://www.bipm.org/en/events/iers/iers_documents.html>, acesso em: 11/02/2008.

EGLI, R.; GEIGER, A.; WIGET, A.; KAHLE, H.-G. A modified least-squares collocation method for the determination of crustal deformation: first results in the Swiss Alps. **Geophysical Journal International**, v. 167, p. 1-12, 2007.

EKMAN, M. The impact of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. **2nd Research School of the Nordic Geodetic Commission, Ebeltoft, Denmark, 1988**. Gävle: Lantmäteriverket (National Land Survey), 1988. 56 p. (Tekniska skrifter/Professional Papers, n. 26).

EUREF. European Vertical Reference System (EVRS). In: TORRES, J. A.; HORNIK, H. (Ed.). **Report on the EUREF Symposium held in Tromso, 22-24 June 2000**. München: Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2000. p. 101-110. 387 p. (Reports of the EUREF Technical Working Group, n. 9). Também disponível em: <http://www.euref-iag.net/symposia/symposia_2000_Tromso.html>, acesso em: 23/01/2008.

FEATHERSTONE, W. E. Do we need a gravimetric geoid or a model of the base of the Australian Height Datum to transform GPS heights? **The Australian Surveyor**, v. 43, n. 4, p. 273-280, 1998. Também disponível em: <<http://www.cage.curtin.edu.au/~geogrp/pubs.html>> Acesso em: 21/09/2006.

FEATHERSTONE, W. E. Absolute and relative testing of gravimetric geoid models using Global Positioning System and orthometric height data. **Computers & Geosciences**, v. 27, n. 7, p. 807-814, 2001.

FEATHERSTONE, W. E. Prospects for the Australian Height Datum and Geoid Model. In: ÁDÁM, J.; SCHWARZ, K.-P. (Ed.). **Vistas for Geodesy in the New Millennium**. Berlin: Springer, 2002. p. 96-101. xvii, 620 p. (IAG Symposia, v. 125). Também disponível em: <<http://www.cage.curtin.edu.au/~geogrp/pubs.html>> Acesso em: 28/10/2005.

FEI, Z. **Refinements of Geodetic Boundary Value Problem Solutions**. Alberta, 2000. xi, 198 f. Tese (Doutorado) – Department of Geomatics Engineering, Univ. of Calgary. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1880/42377>>, acesso em: 26/01/2008.

FERREIRA, V. G. **Análise da componente anômala do geopotencial no Datum Vertical Brasileiro com base no Sistema Lagunar de Imaruí, SC**. Curitiba, 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

FISCHER, I. Mean Sea Level and the Marine Geoid – An Analysis of Concepts. **Marine Geodesy**, v. 1, n. 1, p. 37-59, 1977.

FORSBERG, R. **An overview manual for the GRAVSOF Geodetic Gravity Field Modelling Programs**. incl. comm. by C. C. Tscherning and P. Knudsen (DNSC). DRAFT – 1.ed. 2003.

FREITAS, S. R. C. **Marés gravimétricas: implicações para a placa sul-americana**. São Paulo, 1993. xvii, 264 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto Astronômico e Geofísico, USP.

FREITAS, S. R. C.; LUZ, R. T. Altimetria de Precisão com GPS baseada no SGB: Possibilidades Físicas e Limitações. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4., 1995, Rio de Janeiro. **Resumos Expandidos...** Rio de Janeiro: SBGf, 1995. p. 135-138. v. 1.

FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitudes e Geopotencial. **Bulletin [of the] International Geoid Service**, Milano, n. 9: Special Issue for South America, p. 47-61, 1999. 4, 141 p.

FREITAS, S. R. C.; CORDINI, J.; MARONE, E.; SCHWAB, S. H. S. Vínculo da Rede Altimétrica Brasileira à Rede SIRGAS. **Bulletin [of the] International Geoid Service**, Milano, n. 9: Special Issue for South America, p. 31-46, 1999. 4, 141 p.

FREITAS, S. R. C.; SCHWAB, S. H. S.; MARONE, E.; PIRES, A. O.; DALAZOANA, R. Local Effects in the Brazilian Vertical Datum. In: ÁDÁM, J.; SCHWARZ, K.-P.

(Ed.). **Vistas for Geodesy in the New Millennium**. Berlin: Springer, 2002a. p. 102-107. xvii, 620 p. (IAG Symposia, v. 125).

FREITAS, S. R. C.; SANTOS JÚNIOR, G.; FAGGION, P. L.; GEMAEL, C.; SILVA JÚNIOR, J. S.; SIMÕES, K. Conceção dos levantamentos gravimétricos para o estabelecimento de rede gravimétrica de alta precisão no estado do Paraná. In: MITISHITA, E. A. et al. (Ed.). **Pesquisas em Ciências Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 2002b. p. 41-56. x, 396 p. (Série em Ciências Geodésicas, v. 2).

FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FAGGION, P. L. Modelagem do potencial anômalo no Datum Vertical Brasileiro visando sua nova definição. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 395-419, 2007. Também disponível em: <<http://www.ser.ufpr.br/bcg>>.

FU, L.-L.; CHRISTENSEN, E. J.; YAMARONE JR., C. A. TOPEX/POSEIDON mission overview. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, p. 24369-24381, 1994.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 319 p.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. 1. ed., reimpr. Curitiba: UFPR, 2002. 302 p.

GFZ (2003). **GRACE Gravity Model EIGEN-GRACE01S**. Disponível em: <http://op.gfz-potsdam.de/grace/index_GRACE.html>, acesso: 05/05/2004.

GRAFAREND, E. W. What is a Geoid? In: VANÍČEK, P.; CHRISTOU, N. T. (Ed.). **Geoid and Its Geophysical Interpretations**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 3-32. xvi, 343 p.

GREBENITCHARSKY, R. S.; SIDERIS, M. G. A numerical study of solving the altimetry-gravimetry boundary value problem in coastal regions. In: SANSÓ, F. (Ed.). **A Window on the Future of Geodesy**. Berlin: Springer, 2005. p. 320-325. xvii, 619 p. (IAG Symposia, v. 128).

GROTEN, E. Fundamental Parameters and Current (2004) Best Estimates of the Parameters of Common Relevance to Astronomy, Geodesy, and Geodynamics. **Journal of Geodesy**, v. 77, n. 10-11, p. 724-731, 2004.

HAN, S.-C.; SHUM, C. K.; BEVIS, M.; JI, C.; KUO, C.-Y. Crustal Dilatation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. **Science**, v. 313, p. 658-662, 2006.

HECK, B. An evaluation of some systematic error sources affecting terrestrial gravity anomalies. **Bulletin Geodesique**, v. 64, n. 1, p. 88-108, 1990.

HECK, B.; RUMMEL, R. Strategies for solving the vertical datum problem using terrestrial and satellite geodetic data. In: SÜNKEL, H.; BAKER, T. (Ed.). **Sea Surface Topography and the Geoid**. New York: Springer, 1990. p. 116-128. x, 187 p. (IAG Symposia, v. 104).

HECK, B. Tidal corrections in geodetic height determination. In: LINKWITZ, K. et al. (Ed.). **Applications of Geodesy to Engineering**. Berlin: Springer, 1993. p. 11-24. ix, 431 p. (IAG Symposia, v. 108).

HECK, B. Problems in the Definition of Vertical Reference Frames. In: SANSÒ, F. (Ed.). **V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy**. Berlin: Springer, 2004. p. 164-173. 346 p. (IAG Symposia, v. 127).

HEIFETS, M. IN MEMORIAM OF A SCIENTIST: M. S. Molodensky and his way in science. In: MORITZ, H.; YURKINA, M. I. (Ed.). **M. S. Molodensky In Memoriam**. Graz: Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, v. 88, 2000. p. 41-51. Disponível em: <<http://www.helmut-moritz.at>>, acesso em: 18/10/2007.

HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. San Francisco: Freeman, 1967. xi, 364 p.

HELMERT, F. R. Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. v. 2. 1884.

HERNÁNDEZ, J. N.; BLITZKOW, D.; LUZ, R.; SÁNCHEZ, L.; SANDOVAL, P.; DREWES, H. Connection of the Vertical Control Networks of Venezuela, Brazil and Colombia. In: DREWES, H. et al. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. Berlin: Springer, 2002. p. 324-327. x, 353 p. (IAG Symposia, v. 124).

HIRT, C.; REESE, B.; ENSLIN, H. On the Accuracy of Vertical Deflection Measurements Using the High-Precision Digital Zenith Camera System TZK2-D. In: JEKELI, C. et al. (Ed.). **Gravity, Geoid and Space Missions**. Berlin: Springer, 2005. p. 197-201. xiii, 368 p. (IAG Symposia, v. 129).

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ H. **Physical Geodesy**. Wien: Springer, 2005. xvii, 403 p.

HUBER, P. J. Modeling the length of day and extrapolating the rotation of the Earth. **Journal of Geodesy**. v. 80, n. 6, 2006, p. 283-303.

HWANG, C.; HSIAO, Y.-S. Orthometric corrections from leveling, gravity, density and elevation data: a case study in Taiwan. **Journal of Geodesy**, v. 77, n. 5-6, p. 279-291, 2003.

IBGE. Resolução do Presidente (R. PR) n. 22 de 21/julho/1983. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos. **Boletim de Serviço**, Rio de Janeiro: IBGE, 1983. n. 1602. Também disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtml>, acesso em: 03/11/2005.

IBGE. **Nivelamento Geodésico - Manual de Instruções**. 2. ed. Fortaleza: IBGE, 1985.

IBGE. Norma de Serviço do Diretor de Geociências (NS. DGC) n.29 de 22/setembro/1988. **Padronização de Marcos Geodésicos**. 1988. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/padronizacao_marcos.pdf>, acesso em: 03/11/2005.

IBGE. **Relatório da inspeção do renivelamento da RN nodal do IGG em Mogimirim**. Rio de Janeiro: Departamento de Geodésia, 1990.

IBGE. **Relatório de visita à Estação Maregráfica de Imbituba**. Rio de Janeiro: Departamento de Geodésia, 1997.

IBGE. **Boletim Informativo do Projeto SIRGAS**. Rio de Janeiro: IBGE, 1998. v. 5. 13 p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/publicacao.htm>> Acesso em: 03/11/2005.

IBGE. **Boletim Informativo do Projeto SIRGAS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002a. v. 6. 35 p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/publicacao.htm>> Acesso em: 03/11/2005.

IBGE. **Boletim Informativo do Projeto SIRGAS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002b. v. 7. 111 p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/publicacao.htm>> Acesso em: 03/11/2005.

IBGE. **Relatório da conexão das redes de nivelamento de Bolívia e Brasil em Guajará-Mirim**. Rio de Janeiro: Departamento de Geodésia, 2003.

IBGE. **Correlação dos níveis de referência das Estações da RMPG**. Rio de Janeiro: Departamento de Geodésia, 2004.

IBGE. Arquivos de Dados de Altimetria, Gravimetria e Maregrafia. 2007.

IGG. **Nivelamento Geral do Estado – Altitudes de Precisão**. Boletim no. 36, Instituto Geográfico e Geológico, Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, São Paulo, 1962.

IHDE, J. **Consideration of a Global Vertical Reference System (GVRs) in the IERS Conventions**. IERS Conventions Workshop, Sèvres, 2007. Disponível em: <http://www.bipm.org/en/events/iers/iers_documents.html>, acesso em: 11/02/2008.

IOC. **IOC Training Course for the Global Sea Level Observing System (GLOSS)**, São Paulo, Brazil, 1-19 February 1993. Training Course Report n. 20, 1993, 22 p. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000955/095503eo.pdf>>, acesso em: 20/09/2007.

IOC. **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**. Paris: IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), v. I, 1985. Disponível em: <<http://www.pol.ac.uk/psmsl/manuals/>>, acesso em: 16/02/2007.

IOC. **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**. Paris: IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), v. IV, 2006. v, 80 p. Disponível em: <<http://www.pol.ac.uk/psmsl/manuals/>>, acesso em: 16/02/2007.

JEKELI, C. **Heights, the Geopotential, and Vertical Datums**. Columbus: OSU, 2000. 34 p. (Report, Dept. of Civ. and Env. Eng. and Geodetic Science, n. 459). Também disponível em: <<http://www.ceegs.ohio-state.edu/gsreports/>> Acesso em: 15/08/2005.

KRAKIWSKY, E. J.; MUELLER, I. I. **Systems of Height**. Columbus: OSU, 1965. xxv, 157 p. (Report, Dept. of Geodetic Science, n. 60).

LAMBECK, K. **Geophysical Geodesy: the Slow Deformations of the Earth**. Oxford: Oxford University Press, 1988. xii, 718 p.

LASKOWSKI, P. **The effect of vertical datum inconsistencies on the determination of gravity related quantities**. Columbus: OSU, 1983. ix, 87 p. (Report, Dept. of Geodetic Science and Surveying, n. 349).

LEHMANN, R. Altimetry-gravimetry problems with free vertical datum. **Journal of Geodesy**, v. 74, n. 3-4, p. 327-334, 2000.

LEMOINE, F. G.; KENYON, S. C.; FACTOR, R. G.; TRIMMER, R. G.; PAVLIS, N. K.; CHINN, D. S.; COX, C. M.; KLOSKO, S. M.; LUTHCKE, S. B.; TORRENCE, M. H.; WANG, Y. M.; WILLIAMSON, R. G.; PAVLIS, E. C.; RAPP, R. H.; OLSON, T. R. **The development of the joint NASA GSFC and National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96**. NASA/TP-1998-206861, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 1998.

LENNON, G. W.; WOODLAND, M. J.; SUSKIN, A.A. Acoustic Sea Level Measurements in Australia. In: **Joint IAPSO-IOC Workshop on Sea Level Measurements and Quality Control**, Paris, 12-13 October, 1992. IOC Workshop Report No. 81, UNESCO. p. 26-39. 1992.

LISITZIN, E. **Sea-Level Changes**. Amsterdam: Elsevier, 1974. vi, 286 p.

LOBIANCO, M. C. B. **Determinação das alturas do geóide no Brasil**. São Paulo, 2005. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Também disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21022006-162205/>>, acesso em: 26/09/2006.

LOBIANCO, M. C. B.; BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C. O Novo Modelo Geoidal para o Brasil. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 4., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2005. 1 CD-ROM. Também disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtml> Acesso em: 03/11/2005.

LONGMAN, I. M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 12, p. 2351-2355, 1959.

LOPES, A. B. **O geóide gravimétrico e o nível médio do mar na região do Datum altimétrico brasileiro: um estudo comparativo**. São Paulo, 2006. x, 82 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), USP. Também disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14132/tde-15072006-102136/>>, acesso em: 17/10/2007.

LUZ, R. T. **A Influência das Ondas de Alta e Média Frequência na Observação do Nível do Mar para Aplicações Geodésicas**. Rio de Janeiro, 1996. xvii, 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, UFRJ.

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. Realidade e Perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2., 2001, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2001. 1 CD-ROM. Também disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtml> Acesso em: 12/05/2005.

LUZ, R. T.; FORTES, L. P. S.; HOYER, M.; DREWES, H. The Vertical Reference Frame for the Americas – the SIRGAS 2000 GPS Campaign. In: DREWES, H. et al. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. Berlin: Springer, 2002a. p. 302-305. x, 353 p. (IAG Symposia, v. 124).

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro. In: IAG SYMPOSIUM, 2002b, Santiago. Disponível em: <<http://>>

[www.ibge.gov.br / home / geociencias / geodesia / default_artigos.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtm), acesso: 12/05/2005.

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. Dez Anos de Monitoramento do Nível do Mar no IBGE. In: COLOQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2003. 1 CD-ROM. Também disponível em: <[http://www.ibge.gov.br / home / geociencias / geodesia / default_artigos.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtm)> Acesso em: 12/05/2005.

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R.; MIRANDA, Fr. A.; PALMEIRO, A. S.; SALUSTIANO, S. C. Possibilidades de Integração de Dados Gravimétricos à Rede Altimétrica do SGB para Cálculo de Altitudes SIRGAS no Brasil. In: KRUEGER, C. P. et al. (Ed.). **Cartografia, Instrumento de Renovação Política e Inovação Tecnológica**. Curitiba: UFPR, 2004. p. 42-58. xi, 243 p. (Série em Ciências Geodésicas, v. 4).

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C. Análise do tsunami nos registros das estações da RMPG. In: COLOQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 4., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2005. 1 CD-ROM. Também disponível em: <[http://www.ibge.gov.br / home / geociencias / geodesia / default_artigos.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtm)> Acesso em: 05/05/2006.

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R.; BAEZ, J. C.; PALMEIRO, A. S. Tests on Integrating Gravity and Leveling to Realize SIRGAS Vertical Reference System in Brazil. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. (Ed.) **Dynamic Planet**. Berlin: Springer, 2006a. p. 646-652. xxvi, 909 p. (IAG Symposia, v. 130).

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; HECK, B.; BOSCH, W. Challenges and First Results towards the Realization of a Consistent Height System in Brazil. Aceito para publicação na Série "IAG Symposia", Springer. Abstract in: International IAG/FIG Symposium GRF2006, Geodetic Reference Frames, Munich, Germany, 2006. **Book of Abstracts...** 2006b. Disponível em: <<http://iag.dgfi.badw.de/?236&absid=35>>, acesso em: 23/03/2007.

LUZ, R. T.; BOSCH, W.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R.; HECK, B. Coastal satellite altimetry data and the evaluation of Brazilian vertical reference system and frame. 2007a. In: COLOQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 5., 2007, Presidente Prudente. **Anais...** Pres. Prudente: UNESP, 2007. 1 CD-ROM.

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; PINHEIRO, R. R.; GOLDANI, D.; SANTOS, C. C. C.; DIMAIO PEREIRA, N. R.; SUBIZA PIÑA, W. H. Avaliação das realizações da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro. 2007b. In: COLOQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 5., 2007, Presidente Prudente. **Anais...** Pres. Prudente: UNESP, 2007. 1 CD-ROM.

LUZ, R. T.; BOSCH, W.; FREITAS, S. R. C.; HECK, B.; DALAZOANA, R. Evaluating the Brazilian Vertical Datum through improved coastal satellite altimetry data. Aceito para publicação na Série "IAG Symposia", Springer. Abstract in: IAG Inter-Association Symposia, Excerpt of "Earth, Our Changing Planet – IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007. **Proceedings...** Perugia: Umbria Scientific Meeting Association, 2007c. p. 70. Disponível em: <<http://www.iugg2007perugia.it/webbook/pdf/JG.pdf>>, acesso em: 10/02/2008.

LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T.; FRANCIS, O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. **Ocean Dynamics**. v. 56, p. 394-415, 2006.

MÄKINEN, J. A Note on the Treatment of the Permanent Tidal Effect in the European Vertical Reference System (EVRS). In: TORRES, J. A.; HORNIK, H. (Ed.). **Report on the EUREF Symposium held in Tromso, 22-24 June 2000**. München: Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2000. p. 111-113. 387 p. (Reports of the EUREF Technical Working Group, n. 9). Também disponível em: <http://www.euref-iag.net/symposia/symposia_2000_Tromso.html>, acesso em: 23/01/2008.

MATHER, R. S. The Role of the Geoid in Four-Dimensional Geodesy. **Marine Geodesy**, v. 1, n. 3, p. 217-252, 1978.

MATTOS, A. H. **Ajustamento Preliminar de uma Rede de Nivelamento**. Rio de Janeiro: CNG, 1948. (Biblioteca Geográfica Brasileira, Série B, n. 7).

MCCARTHY, D. D.; PETIT, G. **IERS Conventions (2003)**. IERS Technical Note No. 32. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), 2004. Disponível em: <<http://www.iers.org/iers/publications>>, acesso: 13/01/2006.

MCDOWELL, D. M.; O'CONNOR, B. A. **Hydraulic Behaviour of Estuaries**. ISBN 0-333-12231-3. London: Macmillan, 1977. viii, 292 p.

MERRY, C. L.; VANÍČEK, P. **The Zero Frequency Response of Sea Level to Meteorological Influences**. Technical Report no. 82, University of New Brunswick, Fredericton. 1981.

MIRANDA, F. A. **Contribuição Para Análise do Campo da Gravidade na Região do Datum Vertical Brasileiro**. Curitiba, 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

MORITZ, H. **Advanced Physical Geodesy**. Karlsruhe: Wichmann, 1980. xiii, 500 p.

MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. **Journal of Geodesy**, v. 74, n. 1, p. 128-133, 2000a.

MORITZ, H. Molodensky's Theory and GPS. In: MORITZ, H.; YURKINA, M. I. (Ed.). **M. S. Molodensky In Memoriam**. Graz: Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, v. 88, 2000b. p. 69-85. Disponível em: <<http://www.helmut-moritz.at>>, acesso em: 18/10/2007.

MORITZ, H. Working with Torben Krarup. In: The Krarup Workshop, 2006. Disponível em: <<http://gps.aau.dk/KrarupWorkshop.htm>>, acesso em: 10/01/2008.

MÜLLER, A.; BÜRKI, B.; KAHLE, H.-G.; HIRT, C.; MARTI, U. First Results from new High-precision Measurements of Deflections of the Vertical in Switzerland. In: JEKELI, C. et al. (Ed.). **Gravity, Geoid and Space Missions**. Berlin: Springer, 2005. p. 143-148. xiii, 368 p. (IAG Symposia, v. 129).

NGS. **Geodetic Bench Marks**. NOAA Manual NOS NGS 1. Rockville: NOAA, 1978. iv, 50 p. Disponível em: <http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/GeodeticBMs/>, acesso em: 27/01/2007.

NOVOTNY, K.; LIEBSCH, G.; DIETRICH, R.; LEHMANN, A. Combination of Sea-Level Observations and an Oceanographic Model for Geodetic Applications in the Baltic Sea. In: SANSÓ, F. (Ed.). **A Window on the Future of Geodesy**. Berlin: Springer, 2005. p. 195-200. xvii, 619 p. (IAG Symposia, v. 128).

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. *The MacTutor History of Mathematics*. School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews. Disponível em: <<http://www.mcs.st-andrews.ac.uk>>. Acesso: 14/09/2007.

ON. **Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, 1976-1986**. Departamento de Geofísica, Observatório Nacional. Rio de Janeiro: ON, 1986. iii, 16 p.(+24 s/n^o).

PADÍN DEVESA, J. **Geofísica**. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia. 2007. 180 p. Disponível em: <http://www.upv.es/unigeo/index/docencia/etsigct/geofisica/marco_teo.htm>, acesso em: 28/01/2008.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing** (Vol. 1 of Fortran Numerical Recipes). 2. ed., reprinted (with corrections). Cambridge: Cambridge University Press, 2001. xxxi, 933 p.

PSMSL. Permanent Service for Mean Sea Level. <<http://www.pol.ac.uk>>, acesso em: 1996.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. Chichester: John Wiley, 1987. xiv, 472 p. Disponível em: <<http://www.pol.ac.uk/psmsl/training/books.html>>, acesso em: 17/12/2007.

RAMSAYER, K. Vergleich verschiedener Schwere-reduktionen von Nivellements. **Zeitschrift für Vermessungswesen**, v. 79, n. 5, p. 140-150, 1954.

RAMSAYER, K. **Genauigkeitsuntersuchungen der Schwerereduktion von Nivellements**. München: Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1959. 46, 18, 50 p. (DGK, Reihe A [Höhere Geodäsie], n. 31). [Testes de Precisão da Redução da Gravidade nos Nivelamentos]

RAPP, R. H. **The orthometric height**. Columbus, 1961. 117 p. M. S. Thesis – Department of Geodetic Science, OSU.

RAPP, R. H. The Treatment of Permanent Tidal Effects in the Analysis of Satellite Altimeter Data for Sea Surface Topography. **manuscripta geodaetica**, v. 14, p. 368-372, 1989.

RAPP, R. H. Global Geoid Determination. In: VANÍČEK, P.; CHRISTOU, N. T. (Ed.). **Geoid and Its Geophysical Interpretations**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 57-76. xvi, 343 p.

RAPP, R. H. A World Vertical Datum Proposal. **Allgemeine Vermessungsnachrichten**, v. 102, n. 8-9, p. 297-304, 1995.

REIGBER, C.; SCHMIDT, R.; FLECHTNER, F.; KOENIG, R.; MEYER, U.; NEUMAYER, K. H.; SCHWINTZER, P.; ZHU, S. Y. **A Mean Global Gravity Field Model from GRACE Mission Data Only – Current GFZ Solutions**. In: Geophysical Research Abstracts, Vol. 6 (CD-ROM), 03944, 2004.

RIBEIRO, G. P. **Ajustamento Altimétrico desenvolvido através do Método das Equações de Observação e com Análise Estatística dos Resultados**. Curitiba, 1989. xiv, 245 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

RIBEIRO, G. P.; LUZ, R. T. Resultados Preliminares do Ajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 15., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBC, 1991. p. 155-162. v. 1. Também disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos.shtml>, acesso: 03/11/2005.

ROSMAN, P. C. C. **Modelagem Hidrodinâmica & Ambiental com o SisBaHiA**. In: *Workshop* Panorama atual e futuro da Engenharia Costeira no Brasil, 27/11-02/12/2005, Rio de Janeiro. 2005. Disponível em: <<http://www.oceanica.ufrj.br/costeira/eventos/panorama/contribuicoes.html>>, acesso: 17/11/2005.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA**. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). 2007. 211 p. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>>, acesso em: 05/02/2008.

RUF, C. S.; KEIHM, S. J.; BALASUBRAMANYA; JANSSEN, M. A. TOPEX/POSEIDON microwave radiometer performance and in-flight calibration. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, p. 24915-24926, 1994.

RUMMEL, R.; TEUNISSEN, P. Height datum definition, height datum connection and the role of the geodetic boundary value problem. **Bulletin Geodesique**, v. 62, n. 4, p. 477-498, 1988.

RUMMEL, R.; ILK, K. H. Height datum connection - the ocean part. **Allgemeine Vermessungs-Nachrichten**, v. 102, n. 8-9, p. 321-330, 1995.

RUMMEL, R. Space Geodesy and Earth Sciences. In: ÁDÁM, J.; SCHWARZ, K.-P. (Ed.). **Vistas for Geodesy in the New Millennium**. Berlin: Springer, 2002. p. 584-589. xvii, 620 p. (IAG Symposia, v. 125).

SÁNCHEZ, L. **Reporte 2005, SIRGAS-GTIII**. 2005. 39 p. Disponível em: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol09/23_Sanchez_ReporteGTIII.pdf>, acesso em: 08/08/2007.

SÁNCHEZ, L. Definition and Realisation of the SIRGAS Vertical Reference System within a Globally Unified Height System. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. (Ed.) **Dynamic Planet**. Berlin: Springer, 2006. p. 638-645. xxvi, 909 p. (IAG Symposia, v. 130).

SANTOS JUNIOR, G. **Rede gravimétrica: novas perspectivas de ajustamento, análise de qualidade e integração de dados gravimétricos**. Curitiba, 2005. xvi, 172 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Também disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/2577>>, acesso em: 14/02/2007.

SANSÒ, F. The greening of geodetic theory. In: ÁDÁM, J.; SCHWARZ, K.-P. (Ed.). **Vistas for Geodesy in the New Millennium**. Berlin: Springer, 2002. p. 595-601. xvii, 620 p. (IAG Symposia, v. 125).

SANSÒ, F. IAG Newsletter - October 2007. **Journal of Geodesy**, 2007.

SAVCENKO, R.; BOSCH, W. **BINs: satellite altimeter data re-organized for time series analysis**. In: Geodetic Week 2006, 10-12 October, 2006, Munich, Germany. Disponível em: <http://ifn.bauw.unibw-muenchen.de/gw06/down/presentation_rs.wb.pdf>, acesso em: 11/02/2008.

SCGGSA. Dados de gravimetria da Sub-Comissão para Gravidade e Geóide na América do Sul da IAG. 2006.

SCHMITT, G. **Selected Topics of Adjustment Computations**. Notas de Aula, UFPR. 2007.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. xix, 589 p.

SEEMÜLLER, W.; KRÜGEL, M.; DREWES, H.; ABOLGHASEM, A. **The new position and velocity solution DGF07P01 of IGS Regional Network Associate Analysis Centre SIRGAS (IGS RNAAC SIR)**. AGU Fall Meeting, San Francisco, December 10-14, 2007. Disponível em: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/WS_DGF07P01.pdf>, acesso em: 24/01/2008.

SGE. **Altitudes Provisórias das RN Instaladas pela Antiga Comissão da Carta Geral do Brasil e pelo Serviço Geográfico do Exército**. Separata do Anuário 1949 do SGE, Serviço Geográfico do Exército, Rio de Janeiro. 1950.

SIDERIS, M. G. Regional Geoid Determination. In: VANÍČEK, P.; CHRISTOU, N. T. (Ed.). **Geoid and Its Geophysical Interpretations**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 77-94. xvi, 343 p.

SJÖBERG, L. E. Techniques for Geoid Computation. In: VANÍČEK, P.; CHRISTOU, N. T. (Ed.). **Geoid and Its Geophysical Interpretations**. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 33-56. xvi, 343 p.

SJÖBERG, L. E. A discussion on the approximations made in the practical implementation of the remove–compute–restore technique in regional geoid modelling. **Journal of Geodesy**, v. 78, p. 645–653, 2005.

SUBIZA PIÑA, W. H. **A Determinação de um Modelo Geoidal de Precisão para o Uruguai**. Curitiba, 2000. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

SUBIZA PIÑA, W. H.; SOUSA, M. A.. O Estado da Base de Dados Gravimétricos do Observatório Nacional (BDG-ON) - Situação em junho, 2001. **Brazilian Journal of Geophysics**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 325-328, 2001.

TAPLEY, B. D.; KIM, M.-C. Applications to Geodesy. In: FU, L.-L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite Altimetry and Earth Sciences**. San Diego: Academic Press, 2001. p. 371-406. xii, 463 p.

TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; RIES, J. C.; THOMPSON, P. F.; WATKINS, M. M. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. **Science**, v. 305, p. 503-505, 2004.

TAPLEY, B.; RIES, J.; BETTADPUR, S.; CHAMBERS, D.; CHENG, M.; CONDI, F.; GUNTER, F.; KANG, Z.; NAGEL, P.; PASTOR, R.; PEKKER, T.; POOLE, S.; WANG, F. GGM02 - An improved Earth gravity field model from GRACE. **Journal of Geodesy**, v. 78, 2005.

TENZER, R.; VANÍČEK, P.; SANTOS, M.; FEATHERSTONE, W. E.; KUHN, M. The rigorous determination of orthometric heights. **Journal of Geodesy**, v. 79, n. 1-3, p. 82-92, 2005.

TIERRA CRIOLLO, A. R. **Metodologia para a Geração da Malha de Anomalias Gravimétricas para Obtenção de Geóide Gravimétrico Local a partir de Dados Esparsos**. Curitiba, 2003. xvi, 140 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.

TORGE, W.; TIMMEN, L.; RÖDER, R. H.; SCHNÜLL, M. **The IfE Absolute Gravity Program “South America”, 1988-1991**. München: Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1994. 44 p. (DGK, Reihe B [Angewandte Geodäsie], n. 299).

TORGE, W. **Geodesy**. 3. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. xv, 416 p.

TRAUTH, M. H. **MATLAB Recipes for Earth Sciences**. 2. ed. Berlin: Springer, 2007. xii, 288 p.

TSCHERNING, C. C. Torben Krarup. **Journal of Geodesy**, v. 79, n. 12, p. 719-720, 2006.

UFPR. **Relatório do controle geodésico da Estação da RMPG em Imbituba**. Curitiba: Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites, 2007.

VANÍCEK, P. **Physical Geodesy**. 2. print. Lecture Notes of the Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 1976. 176 p.

VANÍCEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: the Concepts**. 2. ed., 6. print. Amsterdam: Elsevier, 1986. xv, 697 p.

VINZON, S. B.; GALLO, M. N.; MEDEIROS, A. D. **Modelagem Hidrodinâmica da Região Estuarina**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003. Relatório Final, Convênio CT-Hidro-FINEP n. 1801/01. 1 CD-ROM.

ZILKOSKI, D. B.; RICHARDS, J. H.; YOUNG, G. M. Results of the General Adjustment of the North American Vertical Datum of 1988. **Surveying and Land Information Systems**, v. 52, n. 3, p. 133-149, 1992. Disponível em: <http://geodesy.noaa.gov/PUBS_LIB/pub_index.html>, acesso em: 27/01/2007.