



**COPPE/UFRJ**

REDE DE REFERÊNCIA ALTIMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO  
DA ALTIMETRIA POR SATÉLITES E ESTUDOS HIDROLÓGICOS  
NA REGIÃO AMAZÔNICA

Daniel Medeiros Moreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Stéphane Calmant

Rio de Janeiro  
Março de 2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

REDE DE REFERÊNCIA ALTIMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO  
DA ALTIMETRIA POR SATÉLITES E ESTUDOS HIDROLÓGICOS  
NA REGIÃO AMAZÔNICA

Daniel Medeiros Moreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

---

Dr. Stéphane Calmant, D.Sc., HDR

---

Prof. Fernando Pellon de Miranda, Ph.D.

---

Dra. Frédérique Sabine Vachald Seyler, D.Sc., HDR

---

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2010

Moreira, Daniel Medeiros

Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica/ Daniel Medeiros Moreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVIII, 157 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Stéphane Calmant

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 134-140.

1. Redes GPS. 2. Altimetria. 3. Deformação crustal  
4. Estudos hidrológicos 5. Amazônia. I. Rotunno Filho,  
Otto Corrêa *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III.  
Título.



A meus pais,  
Flávio Machado Moreira e  
Sonia Medeiros Moreira.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Otto Corrêa Rotunno Filho (UFRJ) e a meu chefe Achilles Eduardo Guerra Monteiro (CPRM), antes de tudo grandes amigos, que foram fundamentais e me deram todo o suporte e o apoio na minha vida pessoal e na realização desta dissertação.

Ao meu também orientador Stéphane Calmant (IRD/LEGOS), por todos os ensinamentos teóricos e grandes práticas de campo que foram fundamentais para meu crescimento profissional e acadêmico, e, em especial, pela oportunidade e por todo o suporte oferecido para condução deste trabalho.

A Félix Perosanz, pesquisador do GRGS (*Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*), que, apesar de não ser meu orientador oficial, contribuiu de forma fundamental na realização desta pesquisa, transmitindo ensinamentos teóricos sobre o processamento de dados GPS, com fraterna acolhida e atenção durante a minha passagem em Toulouse e iniciação ao Rugby!

Dirijo agradecimento especial aos membros examinadores desta dissertação, em particular a Dra. Frédérique Sabine Vachald Seyler (IRD/LMTG), ao Dr. Fernando Pellon de Miranda (CENPES/COPPE-UFRJ), ao Prof. José Paulo Soares de Azevedo (COPPE/UFRJ) e ao Prof. José Carlos Penna de Vasconcellos (UERJ).

Ao Bosco e ao Manuel, grandes amigos hidrometristas, que proporcionaram sempre as melhores campanhas de campo de que já participei. Sem eles não seria possível realizar este estudo; que eles vivam para sempre para o bem da hidrometria na Amazônia!

Ao grande amigo tricolor Luciano Xavier, que me hospedou em Toulouse, ajudou-me neste trabalho dando todo o suporte quando necessário. A Jean François Crétaux e a Afonso Augusto Magalhães de Araujo, pelo suporte durante minha passagem em Toulouse.

Ao projeto Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões Amazonas, que proporcionou grande partes dos dados estudados, constituindo uma iniciativa conjunta do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e do *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD), com vistas a estudar o comportamento hidrodinâmico e hidrológico da bacia Amazônica, com ênfase no monitoramento hidrológico espacial via sensoriamento remoto.

Registram-se aqui agradecimentos extensivos ao projeto CAPES/COFECUB No. 516/05 – Modelagem hidrológica-atmosférica aplicada à gestão de grandes bacias hidrográficas, ao projeto MCT/FINEP/CT-HIDRO - Bacias Representativas 04/2005, relativo à implantação e a estudos em bacias experimentais com ênfase na região serrana do Rio de Janeiro (bacia hidrográfica do rio Piabanha), envolvendo várias instituições do estado do Rio de Janeiro, ao projeto CTHIDRO 037/2006 – CNPq Curso de Extensão em Hidrometria e ao projeto PROSUL (Edital CNPq N° 005/2007), aprovado no âmbito de redes temáticas, intitulado Técnicas de Sensoriamento Remoto Aplicadas ao Monitoramento Hidrológico e de Mudanças Climáticas na Região Amazônica, que reúne pesquisadores brasileiros, latino-americanos e franceses

Aos amigos da CPRM do Rio e, em especial, a Lígia Maria Nascimento de Araujo, que foi uma pessoa fundamental na minha formação como engenheiro e pesquisador. Pela CPRM de Manaus, muito obrigado a Daniel de Oliveira e a Marco Oliveira por todo suporte e ajuda sempre que solicitados.

Às Anas (AE e AC), Ana Emília Souza e Ana Carolina Steenhagen, que, além de ajudarem bastante nas medições de campo na Amazônia, sempre tornam as campanhas de campo mais divertidas e interessantes.

À Joecila Santos da Silva, que também participou de algumas campanhas, passando sua experiência e ajuda em Toulouse durante a minha estada.

Ao Elias Simão Assayag, com toda a sua experiência em engenharia, sempre ofereceu-nos toda ajuda e suporte em Manaus.

Aos meus amigos da UERJ, em particular do curso de Engenharia Cartográfica, que, embora mais distantes agora, sempre posso contar com eles quando necessário.

A todas as pessoas do GRGS, LEGOS, ANA, COPPE e IRD, que sempre me receberam bem e que sempre me ajudaram quando solicitado.

Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e ao IGS (*International GNSS Service*), por disponibilizarem dados para toda a comunidade GNSS, o que torna possível realizar trabalhos como este aqui apresentado.

Por fim, os meus mais profundos agradecimentos a Deus, à minha mãe, ao meu irmão e ao meu pai (*in memoriam*), que olham por mim onde quer que estejam, com apoio incondicional ao longo de toda a minha vida, sendo fundamentais para minha formação como pessoa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REDE DE REFERÊNCIA ALTIMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO  
DA ALTIMETRIA POR SATÉLITES E ESTUDOS HIDROLÓGICOS  
NA REGIÃO AMAZÔNICA

Daniel Medeiros Moreira

Março/2010

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Stéphane Calmant

Programa: Engenharia Civil

A altitude de referência comum para as estações fluviométricas é necessária para a melhor condução de estudos hidrológicos e hidrodinâmicos. Essa referência é essencial para avaliar a qualidade dos dados hidrológicos obtidos por técnicas de altimetria por satélite. Para avaliar essa tecnologia, o grande desafio é obter uma referência confiável e estável ao longo do tempo. Este trabalho propõe o emprego de uma rede de calibração altimétrica a partir de estações fluviométricas e dados de receptores GPS. A abordagem metodológica abrange o estudo de movimentos verticais, oriundos principalmente de carga hidrológica sazonal, que afeta a região Amazônica, sendo esses fenômenos observados através de estações permanentes GPS. O sinal de carga foi contabilizado e seus resultados utilizados no referenciamento da altitude de estações hidrológicas, permitindo o ajuste de perfis altimétricos de corpos hídricos próximos à faixa de aquisição de dados de altimetria por satélites na bacia Amazônica. O processamento de dados GPS fez uso do código computacional GINS desenvolvido pelo GRGS (*Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*). Os resultados evidenciaram a forte correlação entre movimentos verticais e o ciclo hidrológico na região Amazônica, bem como a aplicabilidade da técnica GPS como suporte a estudos hidrológicos e na avaliação de dados dos satélites GRACE e de modelos de geóide como EGM08.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ALTIMETRIC REFERENCE NETWORK FOR SATELLITE  
ALTIMETRY EVALUATION AND HYDROLOGICAL STUDIES IN THE  
AMAZON REGION

Daniel Medeiros Moreira

March/2010

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho  
Stéphane Calmant

Department: Civil Engineering

A common reference altitude for streamflow gauge stations is needed for a better development of hydrological and hydrodynamic studies. This framework is essential to evaluate the quality of hydrological data derived by the techniques of satellite altimetry. To evaluate this technology, the main challenge is to obtain a reliable and timely stable reference. This work proposes the use of altimetric calibration network based on streamflow gauges and GPS data. The methodological approach englobes the study of vertical displacements due to mainly the seasonal hydrological loading, with impact to the Amazon region. The loading signal was accounted for and the corresponding results were employed in the leveling of the altitude of hydrological station allowing the adjustment of the altimetric profiles with respect to water bodies close to the satellite altimetric tracks along the Amazon basin. The GPS data processing procedure used the GINS software developed by GRGS (*Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*). The results showed the strong relationship between vertical displacements and the hydrological cycle in the Amazon region, as well as the applicability of the GPS technique as support to hydrological studies and to the evaluation of satellite GRACE data and of geoid models such as EGM08.

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa e Relevância	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Área de Estudo	4
1.4 Estrutura do Texto	5
<b>CAPÍTULO 2 - ALTIMETRIA ESPACIAL E REFERENCIAS ALTIMÉTRICOS</b>	<b>7</b>
2.1 Conceitos Básicos de Altimetria Espacial	7
2.1.1 <i>Estação Virtual</i>	10
2.2 Referencial Altimétrico	12
2.2.1 <i>Altitudes Ortométricas</i>	14
2.2.2 <i>Altitudes Normais</i>	15
2.2.3 <i>Altitudes Elipsoidais</i>	15
2.2.4 <i>Modelos de Ondulação Geoidal</i>	19
<b>CAPÍTULO 3 - MOVIMENTOS DA CROSTA TERRESTRE</b>	<b>22</b>
3.1 Movimento das Placas Tectônicas	23
3.2 Maré Terrestre	25
3.3 Maré Polar	26
3.4 Efeitos de Cargas	27
3.4.1 <i>Efeitos de Carga causados por Fenômenos Hidrológicos</i>	28
3.4.2 <i>Carga Atmosférica</i>	29
3.4.3 <i>Carga Oceânica das Marés</i>	30
3.4.5 <i>GRACE- (Gravity Recovery And Climate Experiment)</i>	32
<b>CAPÍTULO 4 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)</b>	<b>35</b>
4.1 Observáveis do Sistema GPS	36
4.2 Erros e Efeitos envolvidos nas Observações GPS	37
4.2.1 <i>Erro de Órbita do Satélite</i>	38

4.2.2	<i>Erros de Relógio do Satélite e Receptor</i>	38
4.2.3	<i>Erros de Antena</i>	39
4.2.4	<i>Refração Ionosférica</i>	39
4.2.5	<i>Refração Troposférica</i>	40
4.2.6	<i>Perda de Ciclos</i>	41
4.2.7	<i>Multi-Caminho</i>	41
<b>CAPÍTULO 5-</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>43</b>
5.1	Estações Permanentes GNSS	45
5.1.1	<i>Rede IGS ( Serviço Internacional GNSS)</i>	45
5.1.2	<i>RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo)</i>	46
5.2	Processamento dos Dados GPS	47
5.2.1	<i>Método da Dupla Diferença de Fase</i>	48
5.2.2	<i>Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)</i>	49
5.2.3	<i>Ajuste da Rede de Estações Permanentes</i>	49
5.2.4	<i>Código Computacional GINS para Processamento de</i>	53
	<i>Dados GPS</i>	
5.2.4.1	<i>Princípios do GINS</i>	56
5.2.4.2	<i>Treinamento e Instalação do Código</i>	57
	<i>Computacional GINS</i>	
5.3	Processamento das Estações Permanentes no GINS	59
5.4	Nivelamento das Réguas Linimétricas	60
5.5	Processamento Cinemático do Perfil dos Rios	60
5.6	Informações Auxiliares	66
<b>CAPÍTULO 6-</b>	<b>COLETA DE DADOS EM CAMPO</b>	<b>68</b>
6.1	Rede de Estações para Monitoramento da Altimetria por	71
	Satélites	
6.2	Instalação e Manutenção da Estação Permanente GPS	73
6.3	Nivelamento das Estações Fluviométricas	77
6.4	Coleta de Dados da Declividade da Linha de Água	77
6.5	Medições de Correntômetros Acústicos de Efeito Doppler	81
	(ADCP)	



<b>CAPÍTULO 7 - RESULTADOS</b>	<b>82</b>
7.1 Solução das Coordenadas Verticais das Estações Permanentes GPS	83
7.1.1 <i>Indicadores da Qualidade da Solução Escolhida PPP</i>	89
7.2 Nivelamento das Estações Fluviométricas	96
7.2.1 <i>Extrapolação dos Valores de Nivelamento das Réguas</i>	104
7.3 Resultados dos Processamentos Cinemáticos e Aplicações do Modelo de Geóide	107
7.3.1 <i>Reservatório de Balbina</i>	110
7.3.2 <i>Santa Luzia</i>	113
7.3.3 <i>Manaus</i>	115
7.3.4 <i>Iracema</i>	117
7.3.5 <i>Urucurituba</i>	119
7.4 Outros Resultados	122
7.4.1 <i>Importância do Nivelamento das Réguas (Porto União)</i>	122
7.4.2 <i>Aplicações de Dados GPS para Análises de Séries Hidrológicas</i>	123
7.4.3 <i>Nivelamento das Seções Batimétricas Obtidas por ADCP ou Ecobatímetros</i>	125
7.4.4 <i>Determinação da Variação Temporal do Coeficiente de Manning</i>	126
<b>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>130</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>134</b>
<b>ANEXO A – DESCRIÇÃO DO ARQUIVO RINEX</b>	<b>141</b>
<b>ANEXO B – PROCEDIMENTOS DE CONFIGURACAO DO GINS</b>	<b>143</b>
<b>ANEXO C – ARQUIVO DIRETOR DO GINS</b>	<b>156</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Área de estudo – região Amazônica, indicando a superposição das trajetórias dos satélites Envisat e Jason-2 em imagem Landsat com composição das bandas 7, 4 e 2.	4
Figura 2.1 - Resolução espacial das trajetórias do Jason 1 e 2 e T/P (linhas em vermelho) e do ERS e ENVISAT (linhas em branco).	8
Figura 2.2 - Processo de aquisição do dado de altimetria espacial (Fonte: ROSMORDUC, 2009; adaptado pelo autor para o português).	9
Figura 2.3 - Seleção de dados de altimetria espacial para criação da estação virtual.	11
Figura 2.4 - Dados coletados pelo satélite ENVISAT - cada série representa uma passagem do satélite..	11
Figura 2.5 - Dados selecionados da série temporal da estação virtual de Iracema- AM (Fonte: SILVA, 2010).	12
Figura 2.6 - Grandezas envolvidas nos referenciais altimétricos. (Fonte FREITAS e BLITZKOW, 1999).	13
Figura 2.7 - Estações e suas técnicas utilizadas na realização do ITRF2005 (Fonte: ALTAMINI, 2009)	17
Figura 2.8 - Ondulação geoidal, (Fonte: Modelo MAPGEO2004).	20
Figura 2.9 - Modelo EGM08 e sua ondulação geoidal (em metros) na área de estudo deste trabalho.	21
Figura 2.10- Modelo de velocidades de placas tectônicas ITRF2005 (Fonte: ALTAMIMI, 2007).	24
Figura 2.11- Efeito da maré solida na região de Manaus.	26
Figura 2.12- Deformação vertical causada por carga hidrológica (Fonte: VAN DAM <i>et al.</i> , 2001).	28
Figura 2.13- Amplitude anual de deformação crustal causada por contribuição de variação de pressão atmosférica com dados NCEP (Fonte: BIANCALE, 2002).	30
Figura 2.14- Carta global da amplitude da maré M2 e seu efeito de carga oceânica em centímetros (Fonte: LEGOS apud PEROSANZ, 2006).	31
Figura 2.15- Variações de estocagem de água mês de abril em mm (Fonte:	33

	RAMILLEN <i>et al.</i> , 2005).	
Figura 2.16-	Variação vertical da estação de BRAZ do IBGE/IGS, comparação com o deslocamento vertical derivado dos dados da missão GRACE (FAZILOVA <i>et al.</i> , 2006).	33
Figura 5.1 -	Fluxograma metodológico para a qualificação do dado altimétrico.	44
Figura 5.2 -	Estações GNSS da Rede IGS (Fonte: DROW <i>et al.</i> , 2009).	46
Figura 5.3 -	Distribuição das estações da RBMC (Fonte: sítio IBGE, <a href="http://www.ibge.gov.br">www.ibge.gov.br</a> ).	47
Figura 5.4 -	Rede local a ajustar são 6 estações da RBMC, 1 estação IGS na Guiana Francesa e 1 estação permanente instalada pela CPRM e o IRD.	50
Figura 5.5 -	Rede de ajuste e estações de referência(em vermelho).	52
Figura 5.6 -	Contribuição do GINS para o CRC (Fonte: PEROSANZ <i>et al.</i> , 2008, adaptado pelo autor para português).	55
Figura 5.7 -	Esquema de envio de dados usuário e servidor do GINS (Fonte: BIANCALE <i>et al.</i> , 2008, adaptado pelo autor para português).	58
Figura 5.8 -	Exemplo das estações utilizadas em dupla diferença para se obter o nivelamento da altura de antena do barco para água.	62
Figura 5.9 -	Seleção de dados GPS para o nivelamento de antena do barco.	63
Figura 5.10-	Exemplo de nivelamento geométrico das alturas da antena do barco (Fonte: CALMANT, 2009).	64
Figura 5.11-	Variação do nível de água medida por dois receptores GPS.	64
Figura 5.12-	Barco movimentando em velocidade; o barco levanta a frente e baixa o fundo; o gráfico mostra a antena GPS do fundo mais baixo que a antena mais a frente.	65
Figura 6.1 -	Identificação cronológica das nove campanhas de campo no ciclo hidrológico.	70
Figura 6.2 -	Locais da rede de estações fluviométricas instaladas para avaliação de tecnologia de altimetria espacial.	72
Figura 6.3 -	Exemplo de estação fluviométrica e seus lances de régua.	73
Figura 6.4 -	Estação permanente GPS de URUK na cidade de Urucurituba nas margens do rio Madeira.	74
Figura 6.5 -	Referência de nível (RN) utilizada para nivelamento das régua	76

linimétricas com referência arbitrária.	
Figura 6.6 - Ocupação de um lance de régua por receptor GPS para nivelamento da estação fluviométrica de Porto União.	76
Figura 6.7 - Forte erosão que afeta as seções de réguas linimétricas e o nivelamento geométrico.	77
Figura 6.8 - Exemplo de percurso do barco realizado para medições da declividade da linha de água.	78
Figura 6.9 - Instalação de receptores e antenas GPS sobre o barco.	79
Figura 6.10- Nivelamento de antenas GPS sobre o barco.	80
Figura 6.11- Medições de linha de água a partir do GPS flutuante.	80
Figura 6.12- Exemplo de seção batimétrica obtida por ADCP.	81
Figura 7.1 - Comparação entre os métodos PPP e dupla diferença em POVE.	83
Figura 7.2 - Comparação entre os métodos PPP e dupla diferença em MABA.	84
Figura 7.3 - Comparação entre os métodos PPP e dupla diferença em MAPA.	85
Figura 7.4 - Comparação entre os métodos PPP e dupla diferença em URUK	86
Figura 7.5 - Variação vertical na estação CRO1 do IGS e referência para o ITRF2005.	87
Figura 7.6 - Variação das coordenadas verticais da estação MANA do IGS e ITRF2005.	88
Figura 7.7 - Variação vertical das coordenadas da estação SANT do IGS e referência para o ITRF2005.	89
Figura 7.8 - Comparação dos deslocamentos verticais entre as séries de dados GRACE, GPS e nível de água da estação fluviométrica em Manaus.	91
Figura 7.9 - Comparação da pressão atmosférica e variações dadas pelo GRACE e GPS.	92
Figura 7.10- Comparação dos deslocamentos verticais entre as séries de dados GRACE, GPS e nível de água da estação fluviométrica no rio Madeira.	93
Figura 7.11- Comparação de deslocamentos verticais entre as séries de dados GRACE, GPS e nível de água da estação fluviométrica de São Gabriel.	94
Figura 7.12- Comparação GRACE e GPS em Macapá.	95

Figura 7.13- Comparação entre séries GRACE, nível de água e estação GPS em Marabá.	96
Figura 7.14- Comparação da variação de coordenadas altimétricas da estação de URUK e NAUS.	97
Figura 7.15- Deslocamento detectado no nivelamento da estação de Santa Luzia.	98
Figura 7.16- Estação de Santa Luzia no período de seca 2008.	99
Figura 7.17- Estação de Santa Luzia na cheia de 2008.	99
Figura 7.18- Estação de Santa Luzia na cheia de 2009.	100
Figura 7.19- Nivelamento da estação fluviométrica de Balbina (Eletronorte).	101
Figura 7.20- Nivelamento da estação fluviométrica de Porto União (CPRM).	101
Figura 7.21- Nivelamento da estação fluviométrica de Urucurituba (CPRM).	102
Figura 7.22- Nivelamento da estação fluviométrica de Iracema (CPRM).	102
Figura 7.23- Nivelamento da estação fluviométrica da estação do Porto de Manaus (ANA).	103
Figura 7.24- Nivelamento da estação fluviométrica de Santa Luzia (CPRM)	103
Figura 7.25- Correlação entre o deslocamento vertical da crosta terrestre e o nível de água na estação de NAUS.	104
Figura 7.26- Simulação de deslocamento vertical dos zeros das réguas gerados pela equação de relação de nível de água e de deslocamento vertical.	106
Figura 7.27- Gráfico do perfil longitudinal do rio Amazonas em altitudes elipsoidais (roxo e escala à esquerda) e ortométricas (vermelho e escala à direita).	108
Figura 7.28- Percurso GPS cinemático no rio Madeira e na sua confluência com o Amazonas.	109
Figura 7.29- Gráfico do perfil do rio Madeira e sua confluência com rio Amazonas	109
Figura 7.30- Percurso executado com GPS cinemático no reservatório de Balbina.	111
Figura 7.31- Gráfico do perfil do lago de Balbina em altitudes ortométrica e elipsoidal.	111
Figura 7.32- Lago de Balbina e os diversos troncos de árvores, que dificultaram o levantamento e o processamento de dados GPS obtidos pela	112

prancha flutuante.	
Figura 7.33- Declividade de Santa Luzia ao longo da linha do Jason-2	113
Figura 7.34- Declividade da estação de Santa Luzia para o início do traço do satélite Jason-2	114
Figura 7.35- Declividade da estação até a linha de passagem do Jason-2.	115
Figura 7.36- Declividade ao longo das linhas de passagem do satélite Jason-2.	116
Figura 7.37- Procedimento de levantamento da declividade da linha de água.	117
Figura 7.38- Declividade da linha de água da estação fluviométrica de Iracema e linha 1 de passagem do satélite Jason-2.	118
Figura 7.39- Declividade da linha 1 do satélite Jason-2.	118
Figura 7.40- Declividade da linha de água na linha 2 de passagem do satélite Jason-2.	119
Figura 7.41- Percurso executado pelo barco e pela prancha GPS na estação de Urucurituba.	120
Figura 7.42- Variação da altura da linha de água na seção montante da ilha realizado pelo GPS no barco.	120
Figura 7.43- Variação da linha de água nas seções entre a ilha de Urucurituba , realizadas pela prancha GPS e pelo barco com GPS acoplado.	121
Figura 7.44- Variação da linha de água entre a estação fluviométrica e a seção a montante da ilha.	121
Figura 7.45- Movimento de massa que causou a desativação da estação fluviométrica Porto União.	123
Figura 7.46- Gráfico de comparação entre as observações em 3 estações fluviométricas	124
Figura 7.47- Perfil longitudinal do rio entre as estações de Santa Luzia e Iracema.	124
Figura 7.48- Gráfico da profundidade e da linha de água em Santa Luzia.	125
Figura 7.49- Estações fluviométricas de Cucuí e São Felipe.	126
Figura 7.50- Coeficiente de Manning no trecho entre as estações de São Felipe e Cucuí.	128

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Técnicas utilizadas na construção do ITRF (Fonte: ALTAMINI, 2009).	17
Tabela 5.1- Dados Tratados pelo GINS e sua precisão estimada (Fonte BIANCALE <i>et al.</i> , 2008).	54
Tabela 7.1- Altura eElipsoidal base (HO) do zero das réguas das estações da área de estudo.	105
Tabela B1- Exemplo de dados do arquivo de estações GINS-PC.	143
Tabela B2- Exemplo do arquivo de valores <i>a priori</i> .	147
Tabela B3- Elementos das diagonais e respectivos pesos.	153
Tabela B4- Exemplo da solução das coordenadas calculadas pelo GINS	154

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

No Brasil, o monitoramento hidrológico básico é uma atividade de responsabilidade federal, que visa gerar informações para subsidiar os estudos e projetos que demandam o conhecimento da disponibilidade hídrica e potencial hidráulico das bacias brasileiras. Para atender a essa finalidade, o Brasil possui uma rede hidrometeorológica, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), que contém 1.852 estações fluviométricas cadastradas em seu banco de dados HIDROWEB, acessível pelo sítio de internet <http://hidroweb.ana.gov.br>.

Apesar da quantidade de estações fluviométricas, o país ainda carece de informação hidrológica básica, fato explicado em função de, atualmente, a rede brasileira ser quatro vezes menos densa do que as redes de países como os Estados Unidos, onde a rede do USGS (*United States Geological Survey*) possui cadastradas 7.500 estações em seu endereço eletrônico <http://water.usgs.gov/nsip/>. Sobre as questões de distribuição geográfica, segundo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization - WMO*) (WMO, 1994), uma bacia precariamente monitorada possuiria pelo menos uma estação por 5750 km<sup>2</sup>. O Brasil possui uma estação a cada 4669 km<sup>2</sup>, mas com uma má distribuição geográfica. Por exemplo, a bacia Amazônica ocupa 44% do território brasileiro e possui, em contrapartida, apenas 14% (271) das estações fluviométricas da rede brasileira. Essa carência na região Amazônica é justificada, em parte, pela dificuldade e alto custo de acesso à região, com longas distâncias entre as estações e os grandes centros e ausência de uma rede viária adequada, sendo a maior parte das estações amazônicas acessada por transporte fluvial e até mesmo por transporte aéreo. A ausência de informação hidrológica nessa região prejudica uma série de trabalhos de engenharia, como alertas de cheias e estudos de potenciais hidráulicos. Para solucionar esses problemas, em parte, uma alternativa de complementação para o monitoramento hidrológico é o emprego da altimetria por satélites, também chamada de altimetria espacial (CALMANT e SEYLER, 2006).

A altimetria espacial é uma tecnologia de sensoriamento remoto que, através do uso de radares altímetros em plataformas orbitais, permite, há mais de 25 anos, o monitoramento dos oceanos, passando, também, a ser aplicada, nos últimos 15 anos, a estudos em águas continentais (CALMANT e SEYLER, 2006). A Amazônia é uma região potencial para as aplicações de altimetria por satélites. Seus extensos rios



possibilitam grandes faixas de aquisição de dados fluviométricos via sensoriamento remoto. Além disso, a grande contribuição para a hidrologia é a possibilidade de aquisição de dados em regiões de difícil acesso e pouco monitoradas.

### **1.1 Justificativa e Relevância**

Uma série de pesquisas sobre aplicações de altimetria espacial já foram realizadas e estão em curso na bacia Amazônica como, por exemplo, trabalhos de CAMPOS *et al.*(2001) com o sensor altímetro do satélite Topex/Poseidon, LEON *et al.*(2006), SEYLER *et al.*(2008) e GETIRANA *et al.* (2009) com o sensor altímetro do satélite Envisat, SANTOS DA SILVA *et al.* (2008) e CALMANT *et al.* (2009) com diversos sensores altímetros, incluindo os satélites Envisat, ERS-2, entre outros. Esses estudos, além de aplicações, contemplam técnicas de avaliação da qualidade dos dados de altimetria espacial através de modelagem hidrológica (GETIRANA *et al.*, 2009), comparação da variação de dados de nível fluviométrico obtidos por estações *in situ*, próximas ao local de aquisição de dados de satélites (CAMPOS *et al.*, 2001), comparação dos dados obtidos entre diversos tipos de sensores altímetros e avaliações estatísticas (SANTOS DA SILVA *et al.*, 2008), previsão de cheias (CALMANT *et al.*, 2009), entre outras análises. Entretanto o uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é, no momento atual, a técnica mais adequada de avaliação de dados altimétricos, sendo feita a partir de medições *in situ* nos locais de passagem dos satélites altimétricos e também a partir do nivelamento das estações fluviométricas próximas. Dessa forma, tanto a informação captada pelo satélite quanto o valor medido na estação *in situ* estariam sob a mesma referência altimétrica, sendo a tecnologia GNSS capaz de prover informações altimétricas no nível centimétrico.

Nesse contexto, a motivação desta dissertação está ancorada na perspectiva de gerar uma rede altimétrica que forneça dados a partir de receptores GNSS capazes de avaliar, a um nível centimétrico, a tecnologia de altimetria por satélites. Neste trabalho, os resultados foram gerados a partir de uma rede específica de validação por receptores GNSS de dados de altimetria espacial em grandes rios, mais especificamente na bacia Amazônica. Provavelmente, esta foi a primeira rede a ser instalada com esse objetivo específico, não sendo encontrados, na literatura especializada, registros de existência de outras redes com a finalidade de validação de altimetria espacial em grandes rios.

A aplicação de nivelamento a uma referência global das estações fluviométricas constitui contribuição no estabelecimento de uma metodologia e de uma proposição para o nivelamento das estações fluviométricas da Rede Nacional de Hidrometeorologia. No presente momento, essa rede não apresenta muitos registros de estações niveladas. Em seu banco de dados (HIDROWEB), grande parte das estações fluviométricas disponíveis apresentam referências arbitrárias, característica que limita a aplicação correta dos dados de níveis de água a estudos hidrológicos e hidrodinâmicos e, por conseguinte, a validação mais apropriada de dados oriundos da altimetria por satélites.

## **1.2 Objetivos**

O presente estudo tem como objetivo prioritário gerar informações altimétricas a partir de receptores GNSS, com precisão centimétrica, que possibilitem avaliar e melhorar a qualidade de dados de cotas fluviométricas obtidos por satélites orbitais. Para criar uma informação altimétrica desse nível de precisão, é necessário o estabelecimento de um referencial altimétrico, o estudo de sua variação ao longo do tempo e a correção de uma série de fenômenos, tais como, efeitos de carga e outros movimentos da crosta descritos no Capítulo 3.

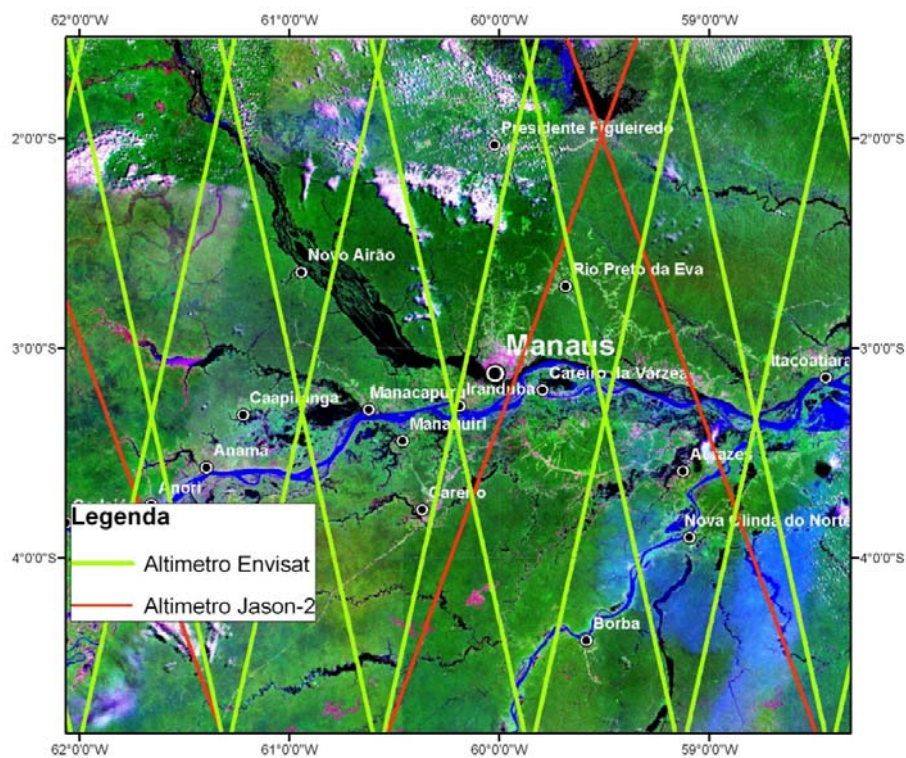
Para alcançar o objetivo proposto, foram estabelecidas as seguintes etapas:

- caracterização de uma referência altimétrica para a área de estudo na região Amazônica;
- uso da referência altimétrica obtida para o nivelamento das estações fluviométricas;
- obtenção de perfis altimétricos ao longo dos locais de passagem do satélite altimétrico de forma a avaliar a declividade ao longo da linha de água no local de aquisição do dado de altimetria espacial.

Em complementação ao objetivo principal do trabalho, serão avaliados os modelos de ondulação geoidal, em especial o modelo EGM08, visando futuras aplicações na tecnologia de altimetria por satélites e estudos hidrológicos. Adicionalmente, são empreendidos esforços na comparação entre os sinais de carga hidrológica derivados da tecnologia GPS e satélites gravimétricos, como é caso do GRACE, empregado nesta dissertação.

### 1.3 Área de Estudo

A área de estudo foi selecionada de forma a facilitar a coleta de dados *in situ* com o objetivo de avaliar a tecnologia de altimetria espacial. Nesse sentido, foram escolhidos pontos de linha de passagem de satélites altímetros próximos à cidade de Manaus. Inicialmente, em 2007, foram escolhidas áreas perto de Manaus visando os locais mais próximos à passagem do satélite altímetro OSTM-Jason-2 (*Ocean Surface Topography Mission on the Jason-2*), que seria lançado, posteriormente, em junho de 2008.



**Figura 1.1 - Área de estudo – região Amazônica, indicando a superposição das trajetórias dos satélites Envisat e Jason-2 em imagem Landsat com composição das bandas 7, 4 e 2.**

Foram escolhidos os pontos de cruzamento dos satélites Jason-2 e Envisat com corpos de água ao longo de quatro trajetórias, sendo duas para cada satélite. No que concerne ao Jason-2, para a primeira trajetória, foram escolhidos os pontos que compõem a linha que passa em Manaus, sobre o rio Negro e sobre o rio Solimões, e, mais adiante, sobre o reservatório de Balbina, em Presidente Figueiredo, ao norte da

Figura 1.1. Uma segunda linha foi selecionada no sentido de incluir a passagem do Jason-2 que cruza a primeira linha na altura do reservatório de Balbina, cruzando o rio Amazonas e o rio Madeira. Para o satélite Envisat, as duas trajetórias escolhidas encontram-se no rio Amazonas, perto da foz do rio Madeira.

### **1.3 Estrutura do Texto**

A dissertação está estruturada em oito capítulos, incluindo o capítulo introdutório, de forma a apresentar com clareza o objetivo do trabalho, fundamentação teórica e revisão bibliográfica, a abordagem metodológica empregada na análise de dados altimétricos, seus referenciais e tecnologias envolvidas com aplicação na região Amazônica, permitindo, ao final, a obtenção dos correspondentes resultados e pertinentes conclusões e recomendações do trabalho.

O segundo capítulo relata alguns fundamentos da tecnologia de altimetria espacial, apresentando conceitos da altimetria espacial na questão de aquisição de dados, resoluções temporais, espaciais e referências altimétricas envolvidas. Nesse mesmo capítulo, também são abordados os referenciais altimétricos utilizados em engenharia e em geodésia, seus conceitos físicos e geométricos, além de formas e critérios de conversão entre dados altimétricos obtidos através de diferentes referenciais.

O terceiro capítulo trata da discussão sobre referenciais altimétricos confiáveis e estáveis ao longo do tempo, abrangendo a questão dos movimentos da crosta terrestre, que afetam de forma significativa a coordenada vertical. A maioria desses movimentos pode ser modelada, e seus valores podem ser corrigidos no tempo. Contudo, existe uma série de movimentos não modelados. A escala desses efeitos atinge de 200 a 1000 quilômetros de distância em relação ao ponto de origem e afeta sistematicamente toda uma região, porém sendo detectados por técnicas de altimetria espacial e por outras técnicas de geodésia espacial.

O quarto capítulo visa discutir conceitos e erros envolvidos na aquisição de dados pela tecnologia GNSS, em particular do sistema global de posicionamento (GPS), escolhida e considerada a melhor atualmente para avaliar informações altimétricas nas proximidades das zonas de passagem dos satélites altímetros.

O quinto capítulo sintetiza a metodologia aplicada no processamento de dados GPS, incluindo o uso do código computacional científico GINS, os métodos de

posicionamento e processamento, redes GPS e a utilização de técnicas auxiliares como o GRACE para ajuda na interpretação dos resultados obtidos.

O sexto capítulo relata os procedimentos envolvidos nas várias campanhas realizadas, sua metodologia, duração, pontos de passagem, os equipamentos utilizados e medições efetuadas.

O sétimo capítulo enfoca a descrição dos resultados gerados durante o processamento de dados GPS, com a avaliação da melhor alternativa a ser empregada nesse processamento, em particular no tocante a variações verticais de várias técnicas como GRACE, estações fluviométricas e GPS. Adicionalmente, as análises permitiram definir perfis cinemáticos a partir de receptores GPS sobre a linha de água, contrastando-os com as altitudes físicas providas por modelos de geóide, como é o caso do EGM08, empregado na presente pesquisa.

O oitavo capítulo encerra a dissertação informando conclusões gerais sobre as técnicas aplicadas, situando os resultados obtidos no contexto mais geral e sinérgico de altimetria espacial e estudos hidrológicos, formulando-se, então, recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

## **CAPÍTULO 2 - ALTIMETRIA ESPACIAL E REFERÊNCIAS ALTIMÉTRICAS.**

Conforme estabelecido no primeiro capítulo, o presente trabalho visa estabelecer uma rede de referências altimétricas para avaliação de dados de altimetria por satélites. Para cumprir esse objetivo, faz-se necessária a compreensão de alguns fundamentos de altimetria por satélites, da referência altimétrica do dado espacial e de outros referenciais altimétricos empregados em estudos de engenharia.

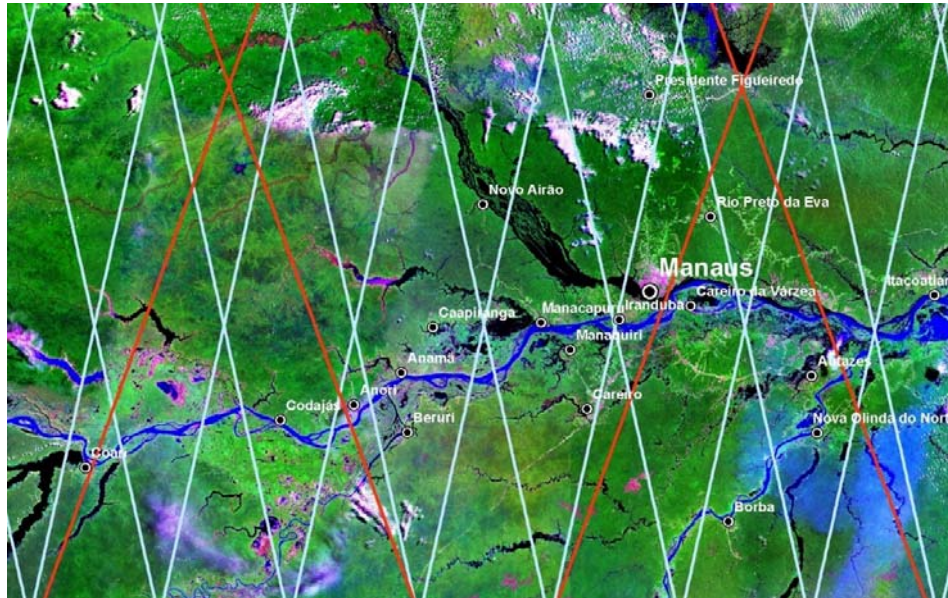
Neste capítulo, serão descritos o processo de aquisição de dados de altimetria espacial, uma técnica que foi desenvolvida para monitoramento dos oceanos, mas que, nos últimos anos, vem sendo aplicada para obtenção de dados de nível de águas continentais. Além disso, serão descritos o caráter não físico de seu valor altimétrico, sua relação com sistemas geodésicos, sua relação com altitudes físicas e conversões. A partir desses conceitos, pode ser aperfeiçoada a avaliação dos dados de satélites altimétricos e também a correspondente aplicação em estudos de pesquisa e engenharia.

### **2.1 Conceitos básicos de altimetria espacial**

A altimetria espacial efetuou seus primeiros passos nos anos 70 do século passado com a missão SKYLAB, mais especificamente entre os anos de 1973 e 1974, com uma precisão estimada do altímetro de 1 a 2 metros (SEEBER, 2003). Posteriormente, novos satélites altimétricos foram lançados, destacando-se, entre eles, GEOS-3 (1975), SEASAT-1 (1978), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), Topex/Poseidon (1992), Jason-1 (2001), Envisat (2002) e Jason-2 (2008). No decorrer dessas missões, as precisões dos altímetros foram melhoradas chegando a níveis centimétricos, com maior refinamento no cálculo de órbita do satélite, bem como na evolução no procedimento de modelagem dos efeitos atmosféricos na propagação do sinal.

Os dados gerados pela altimetria espacial são adquiridos de forma contínua sobre o globo terrestre, sendo que cada passagem em um ponto é caracterizada pelo número do ciclo orbital; contudo, cada local tem período de revisita de acordo com a missão: no caso do Topex/Poseidon, Jason-1 e Jason-2, são 10 dias; no que concerne ao ERS-2 e ao Envisat, são 35 dias. A resolução espacial dos dados de altimetria espacial está ligada à distância entre as linhas de passagem. Nesse aspecto, para o Topex/Poseidon, Jason-1 e Jason-2, tem-se uma distância de 315 quilômetros, no Equador, entre as linhas de

passagem, enquanto, para o ERS-2 e para o Envisat, a linha de passagem tem uma distância mais curta, com cerca de 80 quilômetros no Equador (ROSMORDUC, 2009).



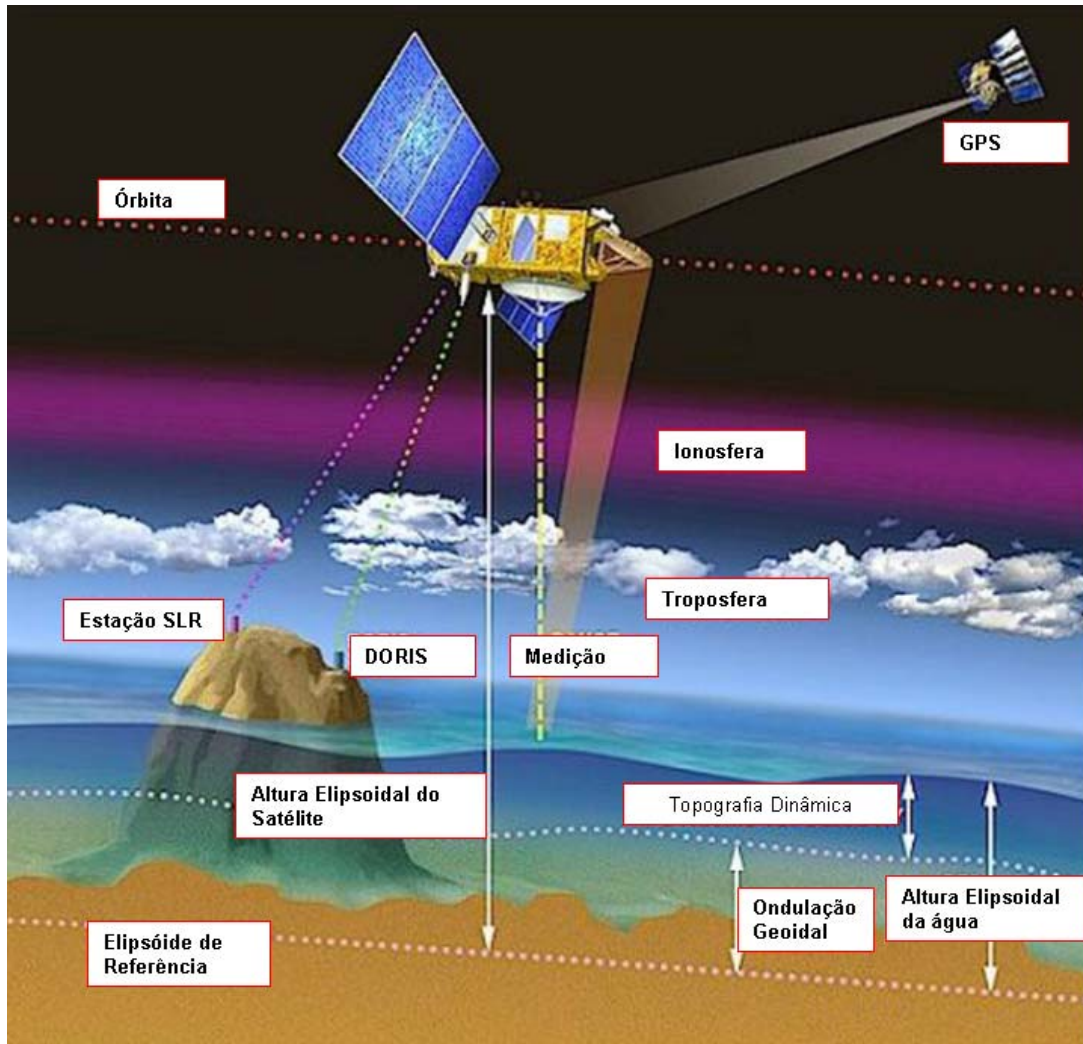
**Figura 2.1- Resolução espacial das trajetórias do Jason 1 e 2 e T/P (linhas em vermelho) e do ERS e Envisat (linhas em branco) em imagem Landsat com composição das bandas 7, 4 e 2.**

O satélite altímetro emite uma série de pulsos na direção nadir. Esses pulsos percorrem o espaço e as camadas da atmosfera até encontrarem a superfície refletora, sendo, no caso, corpos de água. O cálculo é baseado, então, na velocidade do pulso mensurado por meio do tempo de retorno do sinal para o satélite altímetro, em que são aplicadas diversas correções, incluindo correções da velocidade do pulso devido aos efeitos de refrações ionosféricas e troposféricas e a movimentos da Terra.

A técnica de altimetria espacial utiliza-se de um satélite como plataforma para um sensor, chamado de radar altímetro, que transmite, à superfície terrestre, pulsos de energia na frequência das microondas e recebe o sinal de retorno após este ser refletido pela superfície. O radar altímetro trabalha na banda Ku, com frequência em torno de 13,575 Ghz (Envisat). O princípio da obtenção do dado, como é mostrado na Figura 2.2, baseia-se na determinação da órbita do satélite através de técnicas do sistema de posicionamento global (GPS - *global positioning system*), de alcance por satélite a laser (SLR - *satellite laser ranging*) e do sistema francês de órbita por sinal Doppler e posicionamento de rádio integrados por satélite (DORIS - *doppler orbitography and*



*radiopositioning integrated by satellite*), permitindo, assim, a determinação da posição do centro de fase da antena do altímetro (ROSMORDUC *et al.*, 2009).



**Figura 2.2- Processo de aquisição do dado de altimetria espacial (Fonte: ROSMORDUC, 2009; adaptado pelo autor para o português).**

O valor do dado altimétrico do satélite corresponde à medida do sinal de radar sobre a água em determinada região chamada área de abrangência (*footprint*) e de seu retorno para o satélite, onde, a partir do uso de algoritmos chamados “*trackers*”, será estimado o valor mais representativo de modo a definir a medição nadir entre o satélite e a superfície líquida (CALMANT, comunicação pessoal 2010).

O tamanho da área de abrangência (*footprint*), é, em geral, entre 2 e 10 km<sup>2</sup>, podendo ser maior ou menor devido à rugosidade da superfície líquida, à magnitude e à forma do sinal de retorno, produzindo o que se convencionou chamar de eco ou forma



de onda, que contém informações importantes sobre as características da superfície refletora (ROSMORDUC *et al.*, 2009).

É importante salientar que essa medida do dado altimétrico, devido à definição da órbita do satélite altímetro, está relacionada ao elipsóide de revolução, figura matemática que define melhor a forma da Terra, obtendo-se, assim, valores de altitudes elipsoidais. Esse tipo de altura será descrito com maiores detalhes no item 2.2 sobre referenciais altimétricos. Maiores informações sobre a técnica de altimetria espacial podem ser encontradas em CHELTON *et al.* (2001), SEEBER (2003) e ROSMORDUC *et al.* (2009).

Inicialmente, as aplicações da técnica de altimetria espacial foram desenvolvidas para o monitoramento dos oceanos, para estudos com enfoque em questões de mudanças climáticas, geodésia e geofísica. Em águas continentais, mais especificamente sobre os rios, somente mais recentemente começaram a surgir as primeiras aplicações que visam a suprir a falta de informação hidrológica e o decréscimo de estações de monitoramento *in situ* a nível mundial, como citado por CALMANT e SEYLER (2006).

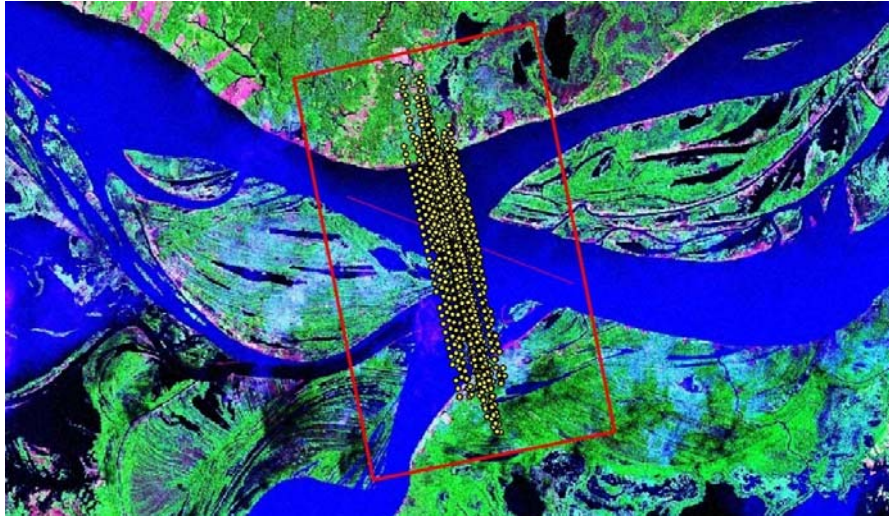
Nos rios, o sinal obtido contém diferentes características de regiões de mar aberto, recebendo, por exemplo, ruídos das margens. Esses ruídos podem ser minimizados fazendo-se o reprocessamento dos dados brutos através do uso de outros algoritmos existentes mais apropriados para os rios. A escolha do melhor algoritmo pode ser baseada em medições *in situ*, tais quais as medições propostas e geradas por esta dissertação.

Em águas continentais, mais especificamente na região amazônica, existe uma série de aplicações da tecnologia de altimetria espacial em águas continentais com destaque para trabalhos de CAMPOS *et al.* (2001), BIRKETT *et al.* (2002), LEON *et al.* (2006), SEYLER *et al.* (2008), CALMANT *et al.* (2009), GETIRANA *et al.* (2009) e SILVA (2010), envolvendo os satélites Envisat, ERS e Topex.

### **2.1.1 Estação Virtual**

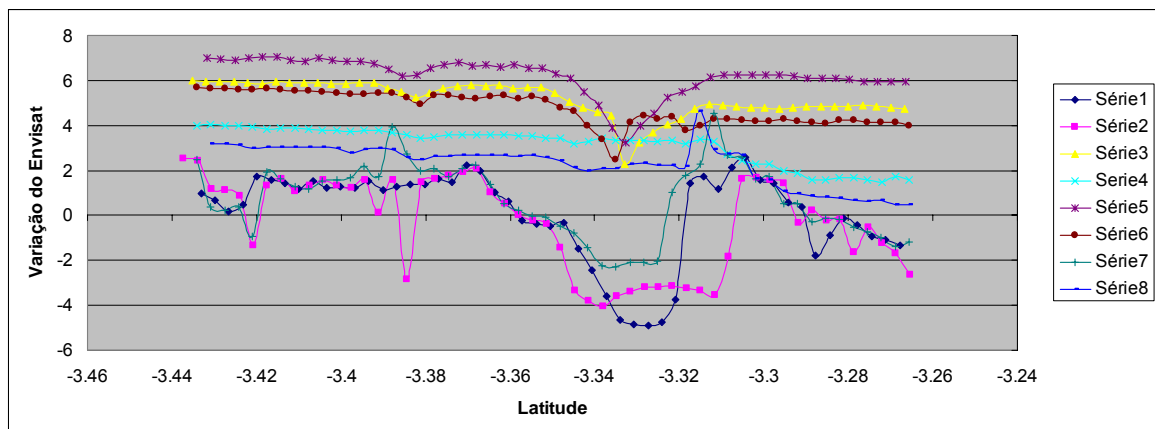
Um conjunto de medições de dados de altimetria espacial, adquirido quando do cruzamento do satélite com um rio, pode ser analisado sob a perspectiva do que se denomina estação virtual (CALMANT e SEYLER, 2006). O termo virtual é usado para diferenciar o fato de que a estação convencional fluviométrica está materializada

no local, enquanto a estação dita virtual é criada a partir de medições de satélites com capacidade de produzir dados de variação dos níveis de água no local. A Figura 2.3 mostra o exemplo do cruzamento do satélite Envisat com o rio Amazonas e os dados gerados de altimetria espacial nas diversas passagens.



**Figura 2.3- Seleção de dados de altimetria espacial para criação da estação virtual em imagem Landsat com composição das bandas 7, 4 e 2.**

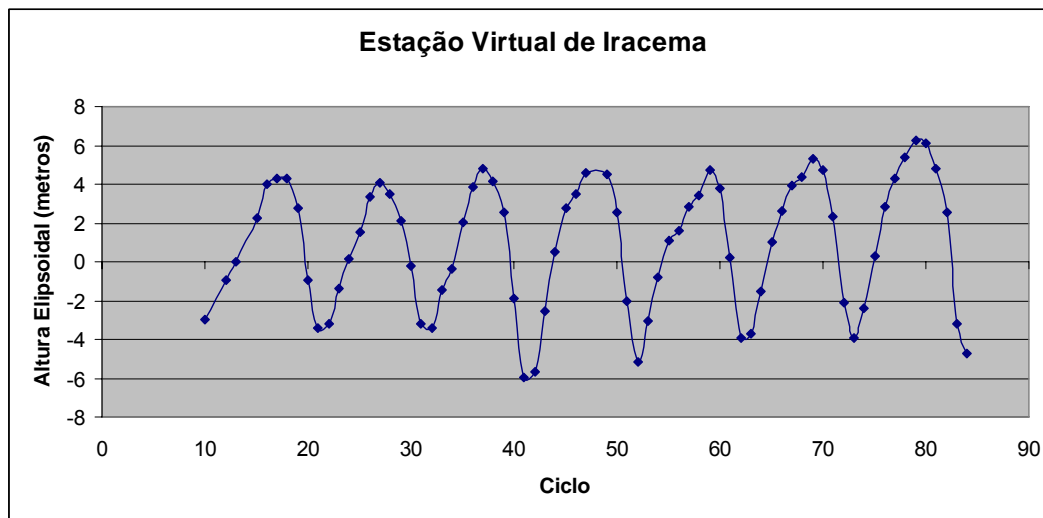
Na seqüência (Figura 2.4), segue o exemplo dos valores coletados das passagens do satélite Envisat no local da Figura 2.3.



**Figura 2.4- Dados coletados pelo satélite Envisat - cada série representa uma passagem do satélite.**

Para formar a estação virtual, é feita uma análise em conjunto das medições altimétricas de cada passagem. Os valores obtidos ao longo de uma seção são submetidos a um processo seletivo (SILVA, 2010), sendo eliminados dados espúrios e escolhendo-se aqueles que são mais representativos da medição. A seleção pode ser

feita por processos automáticos, que ainda carecem de aperfeiçoamento, sendo que, no momento, êxitos maiores têm sido obtidos via procedimento manual efetuado por especialistas apoiados por ferramentas computacionais como o VALS Tools (2009) e com suporte nos conceitos e fundamentos de altimetria espacial. A título de ilustração, segue a seleção pontual dos ciclos da área das Figuras 2.3 e 2.4, conforme SILVA (2010).



**Figura 2.5- Dados selecionados da série temporal da estação virtual de Iracema- AM (Fonte: SILVA, 2010).**

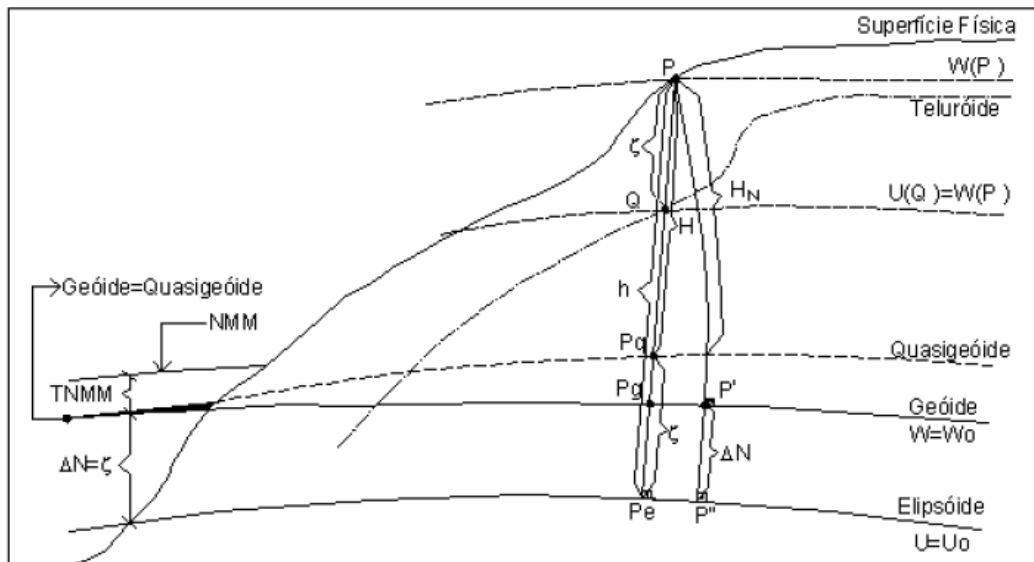
Dados das diversas missões de altimetria espacial podem ser adquiridos através do sítio do CTOH (*Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere*) no endereço eletrônico <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/>.

## **2.2 Referencial Altimétrico**

Em todas as áreas que necessitam de um controle altimétrico, o estudo dos referenciais é uma etapa indispensável, pois constituem a base dos cálculos de desníveis das medidas. Em projetos de engenharia, é usual empregar uma referência altimétrica arbitrária. Apesar de solucionar o problema localmente, uma referência altimétrica arbitrária impede o estabelecimento de uma base comum para a conexão e articulação entre os diversos projetos, fato que pode ocasionar diversos problemas. Na rede hidrometeorológica nacional, como mencionado no capítulo introdutório, estima-se, pela consulta no sítio do HIDROWEB, que 99% das estações fluviométricas possuem uma referência arbitrária, o que impossibilita, limita ou prejudica estudos

hidrodinâmicos e hidrológicos. Por outro lado, a avaliação rigorosa da tecnologia de altimetria por satélites, sem uma referência vertical comum para as diversas estações fluviométricas, fica igualmente limitada. Dados fluviométricos sem referência vertical comum inviabilizam definir com precisão o perfil longitudinal dos rios e sua variação com o tempo, calcular parâmetros hidrodinâmicos como o coeficiente de Manning, estabelecer o potencial hidráulico, auxiliar a navegação e fixar um controle vertical das cheias definindo assim áreas de risco de inundação, entre outras atividades e ações.

Para definir uma referência altimétrica com o máximo rigor, é preciso recorrer à Geodésia, ciência que estuda a forma e dimensões da Terra, do seu campo de gravidade e de suas variações no tempo (GEMAEL, 1999). Na Geodésia, são usadas freqüentemente três tipos de referências verticais, chamadas de geóide, quase-geóide e elipsóide de referência (BLITZKOW *et al.*, 2002), sendo que essas referências podem ser definidas globalmente ou para uma região específica, conforme será descrito a seguir .



**Figura 2.6- Grandezas envolvidas nos referenciais altimétricos (Fonte: FREITAS e BLITZKOW, 1999).**

### 2.2.1 Altitudes Ortométricas

O geóide é definido como a superfície equipotencial que melhor se ajusta ao nível médio dos mares. O nível médio dos mares é escolhido como uma superfície de referência que melhor define a forma da Terra por ser uma superfície de equilíbrio hidrostático e estar sempre procurando adequar-se às forças atuantes sobre o nosso planeta, além da maior parte da superfície terrestre ser coberta pelos oceanos. No Brasil, o nível médio dos mares é definido pelas observações maregráficas tomadas entre os anos de 1949 e 1957 no Porto de Imbituba, no litoral do estado de Santa Catarina (DALAZOANA, 2005).

As altitudes que tem como seu referencial o geóide são chamadas de ortométricas, sendo definidas pela distância vertical do ponto da superfície terrestre até o geóide. Contudo a distância da superfície para o geóide no continente não pode ser estimada com exatidão, impossibilitando a obtenção exata das altitudes ortométricas, tendo em vista que a real posição do geóide é dependente da densidade dos materiais que compõe a litosfera. Podem ser usados modelos simplificados da distribuição de densidades litosféricas para obtenção da posição estimada do geóide (FREITAS, BLITZKOW, 1999).

A escolha do *datum* vertical tem um caráter local e temporal, pois o valor do nível médio dos mares varia devido a mudanças climatológicas, de local para local, pelos diferentes fatores climáticos e oceanográficos que impactam, de forma diferente, cada ponto da costa. Esses fatores são os principais agentes de definição da grandeza chamada topografia do nível médio do mar (TNMM). Devido a esse fato, outros marégrafos instalados em outros países e mesmo na costa brasileira possuem valores diferentes, dificultando, assim, a conexão de redes altimétricas que usam *data* verticais distintos (LUZ, 2008).

Atualmente, também, percebe-se a necessidade de se ter uma referência altimétrica única, pois, apesar das diferentes soluções dos referenciais altimétricos não originarem problemas notórios para aplicações locais, sabe-se que, conforme se aumenta a área de abrangência do estudo ou do projeto, conseqüências desastrosas podem ser geradas em aplicações nacionais ou continentais. No momento atual, existem centenas de *data* verticais espalhados pelo globo, sendo que cada *datum* apresenta especificidades no tipo de definição, na realização e no tempo de observação, causando diversas incompatibilidades. Adicione-se a essa discussão a dificuldade de levar

informações altimétricas, via nivelamento geométrico, para algumas regiões específicas. No Brasil, esse fato é ilustrado pela impossibilidade de levar, através de nivelamento geométrico, cotas obtidas a partir do marégrafo instalado em Imbituba-Santa Catarina para parte da região norte do Brasil devido à largura do rio Amazonas. Assim, as cotas de parte da região norte estão referenciadas ao marégrafo de Santana no Amapá (LUZ, 2008).

### **2.2.2 Altitudes Normais**

Outro tipo de conceito de altitude, que pode ser usado, surge com a impossibilidade de se conhecer a variação das densidades no interior da crosta terrestre sem utilizar modelos da distribuição de densidades. Nesse sentido, Molodenskii, em 1945, propôs a resolução desse problema de geodésia física utilizando valores de gravidade encontrados na superfície física. Sendo assim, o geóide é, então, substituído por uma superfície, designada de teluróide, que é definida como a superfície cuja distância para o elipsóide é a mesma distância da superfície física para o geóide. Quando as medidas são feitas a partir de um elipsóide, a superfície encontrada não define o geóide, mas sim o quase-geóide. No oceano, o geóide e o quase-geóide coincidem; por outro lado, em regiões montanhosas, a diferença pode chegar a metros (BLITZKOW *et al.*, 2002). Altitudes com referência ao quase-geóide são chamadas de altitudes normais.

Apesar do referencial altimétrico brasileiro ser atualmente de altitudes ortométricas, para o sistema referencial geocêntrico para as Américas (SIRGAS), foi recomendado que os países da América do Sul adotassem o sistema de altitudes normais (BLITZKOW *et al.*, 2002). A altitude normal proporcionaria que todos os dados altimétricos estivessem sob a mesma referência, além de serem compatíveis com as técnicas de posicionamento global. Todavia tais mudanças ainda levarão um tempo para serem adotadas, pois estudos do impacto e de outras dificuldades na aplicação de um novo *datum* vertical para o Brasil devem ainda ser analisados (LUZ, 2004).

### **2.2.3 Altitudes elipsoidais**

A altitude elipsoidal está ligada com a posição tridimensional do ponto observado. A definição de posição é um dos objetivos das tecnologias de geodésia espacial, bem

como de altimetria espacial e de GNNS. Para atingir esse objetivo, no entanto, faz-se necessário definir uma referência.

Nesse sentido, pode-se dizer que um sistema de referência terrestre é um referencial matemático que define a posição em que o ponto será expresso, constituindo, assim, um objeto matemático. Todavia, para se obter a posição do ponto, são necessários meios de observação que o liguem ao objeto matemático; é, pois, preciso realizar o sistema de referência terrestre, materializando-o fisicamente por meio do uso de técnicas de geodésia espacial (ALTAMINI, 2002).

A materialização do sistema é feita por um conjunto de coordenadas de estações terrestres, obtidas através de diferentes técnicas de posicionamento, criando a rede de referência.

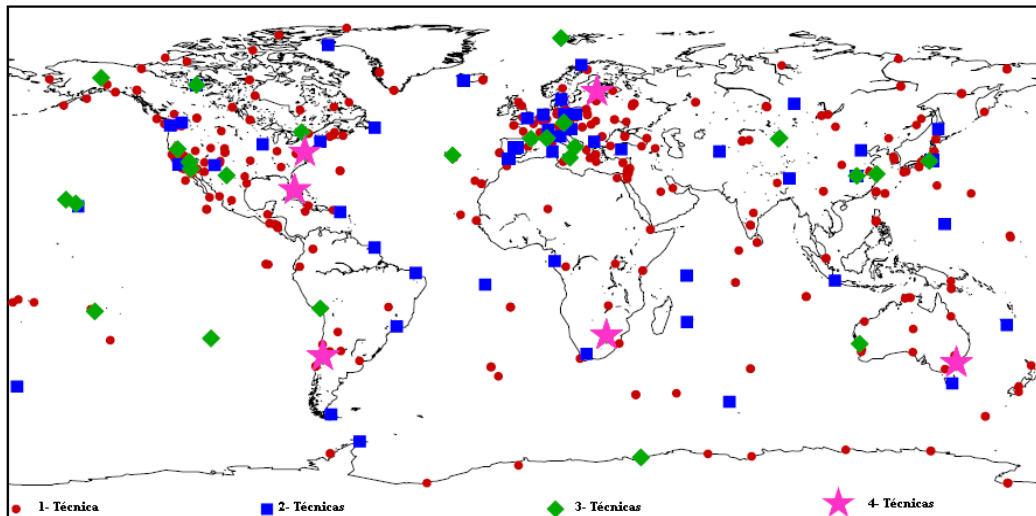
Enquanto o elipsóide de revolução define a forma da Terra, sendo a figura matemática que mais se assemelha ao geóide, o sistema de referência terrestre posiciona e orienta o elipsóide no espaço.

A realização do sistema de referência terrestre (TRS), mais preciso atualmente em nível global e utilizado em aplicações geodésicas, é feita pelo Serviço Internacional de Rotação da Terra (IERS - *International Earth Rotation Service*), sendo chamada de ITRF (*International Reference Frame System*), O ITRF segue as seguintes características :

- sua origem é o centro de massa da Terra, considerando-se oceanos e atmosfera;
- a unidade de comprimento é o metro (SI); essa escala é consistente com TCG (tempo coordenado geocêntrico), de acordo com as resoluções de 1991 IAU (*International Astronomical Union*) e IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*)
- sua orientação é equatorial, onde o eixo Z define o pólo terrestre; utiliza-se o Equador médio de 1900-1905 (VASCONCELLOS, 2003).

O ITRF consiste na realização do TRS, a cargo do IERS. A realização é efetuada pelo ajustamento de várias estações, com as coordenadas das estações sendo obtidas através da combinação de várias tecnologias de posicionamento espacial: VLBI, SLR, GNSS e DORIS. A grande vantagem é utilizar estações para as quais duas ou mais técnicas de posicionamento espacial são empregadas, podendo-se, assim, determinar a

diferença entre as soluções. Apesar de qualquer técnica ser capaz de determinar os parâmetros de orientação da Terra necessários para a realização de um referencial, utiliza-se a combinação das soluções dadas pelos diversos métodos (*very long base interferometry* -VLBI, *satellite laser ranging* - SLR, *global navigation satellite system* - GNSS e *Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite* -DORIS) para, assim, escolher a técnica mais adequada para cada parâmetro apresentado na Tabela 2.1 (ALTAMINI *et al.*, 2007).



**Figura 2.7-Estações e suas técnicas utilizadas na realização do ITRF2005**  
(Fonte: ALTAMINI, 2009)

**Tabela 2.1 - Técnicas utilizadas na construção do ITRF (Fonte: ALTAMINI, 2009)**

Definição/Técnica	VLBI	SLR	GNSS	DORIS
Referencial Celestial e UT1	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
Movimento de Polo	SIM	SIM	SIM	SIM
Fator de Escala	SIM	SIM	NÃO	SIM
Origem do ITRF	NÃO	SIM	FUTURAMENTE	FUTURAMENTE
Desidade Geográfica	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Tempo-Real e acesso ITRF	SIM	SIM	SIM	SIM
Estabilidade Decadal	SIM	SIM	SIM	SIM



A determinação das órbitas dos satélites, tanto pela tecnologia GNSS como pela altimetria espacial, a execução de processos envolvidos nos cálculos de coordenadas e nos modelos de correções dos dados brutos observáveis e finalmente o resultado estão atrelados a um sistema geodésico, sendo preciso considerar diferenças na comparação de produtos e dos processos aplicados a partir de diferentes sistemas de referência.

Existe uma série de sistemas geodésicos com diferentes elipsóides, estações usadas na sua materialização e diferentes épocas. As transformações entre os diversos sistemas geodésicos e suas épocas específicas devem ser feitas através da transformação de Helmert generalizada, que aplica transformação de 7(14) parâmetros que definem a posição e a orientação de um sistema geodésico em relação ao outro. Aplicam-se 3 translações para os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , que definem as variações do geocentro, ponto este que define a posição do centro do elipsóide, um fator de escala do elipsóide e ainda 3 rotações, uma para cada um dos eixos, totalizando 7 parâmetros. No caso de sistemas com diferentes épocas de realização, deve-se considerar a variação no tempo de cada um dos parâmetros, totalizando, assim, 14 parâmetros a serem estimados. No caso de transformação de coordenadas terrestres de diferentes épocas, deve-se levar em conta as correspondentes variações devido a movimentos da crosta, como os deslocamentos das placas litosféricas descritas no item 3.1, devendo-se, portanto, adicionar as componentes do vetor velocidade ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ) nos cálculos de cada estação (SAPUCCI e MONICO, 2001).

Contudo deve-se ter critério no cálculo dos parâmetros a serem utilizados, pois as técnicas utilizadas devem respeitar suas limitações e a área de abrangência das estações empregadas. Adicionalmente, há a necessidade de calcular ou modelar a influência de efeitos que causam variações locais na posição da estação, tais como movimentos causados por abalos sísmicos, efeitos de carga, entre outros, que serão descritos no Capítulo 3.

O sistema de referência utilizado neste trabalho é o ITRF2005s, que é a versão do ITRF2005 com a aplicação do efeito de escala pela tecnologia SLR (*satellite laser ranging*) em 2006, possuindo seu semi-eixo maior com 6.378.136,46 metros e achatamento com número de 298,257650. Todavia é possível transformar os resultados obtidos para qualquer sistema associado ao ITRF, incluindo o sistema SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) utilizado no Brasil.

Como demonstrado no item 2.1, a posição do satélite altímetro deve ser determinada em relação a um sistema de referência; com a determinação de sua posição

e emissão do pulso de radar na posição nadir, é, assim, obtida a altitude elipsoidal do ponto medido. A altitude elipsoidal pode ser definida pela distância do ponto medido ao longo da linha normal até o elipsóide de referência.

Devido ao fato do elipsóide ser uma figura matemática e suas altitudes elipsoidais terem um caráter geométrico, não há uma representação adequada dos processos físicos. Portanto, uma superfície equipotencial como um lago pode ter diferentes valores de altitude elipsoidal em seus pontos; da mesma forma, pode-se encontrar superfícies com diferentes potenciais, mas com o mesmo valor de altitude elipsoidal.

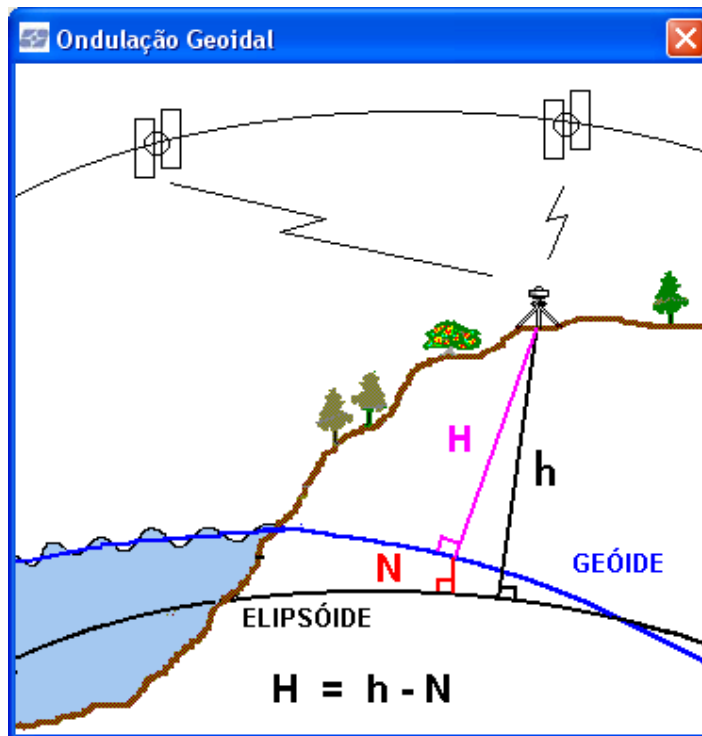
Uma altitude com significado físico é fundamental para o correto mapeamento da superfície terrestre, e aplicações de altitudes puramente geométricas em obras de engenharia devem sofrer restrições (FREITAS e BLITZKOW, 1999). Por outro lado, aplicações de altitudes elipsoidais são muito importantes para demonstrar variações temporais de coordenadas verticais causadas por efeitos geodinâmicos como terremotos, efeitos de cargas por ações climatológicas e por atividades antrópicas, como deformações crustais causadas por barragens.

Ressalta-se ainda que as altitudes elipsoidais podem ser reduzidas ao geóide ou quase-geóide utilizando modelos de ondulação geoidal, que serão descritos no item 2.2.4, exposto a seguir.

#### **2.2.4 Modelos de Ondulação Geoidal**

Com o avanço e aplicações das técnicas oriundas da geodésia espacial, as quais são referenciadas ao elipsóide e contêm um significado geométrico da altitude, faz-se necessário atribuir um caráter físico a essas altitudes. Nesse sentido, foi desenvolvida uma série de modelos que definem a ondulação geoidal, termo que é utilizado para definir a distância que separa o geóide do elipsóide de referência.

Pode-se observar, na Figura 2.8, a representação da ondulação geoidal, que pode ser expressa pela fórmula seguinte:  $N$  (ondulação do geóide) =  $h$  (altitude elipsoidal) –  $H$  (altitude ortométrica).



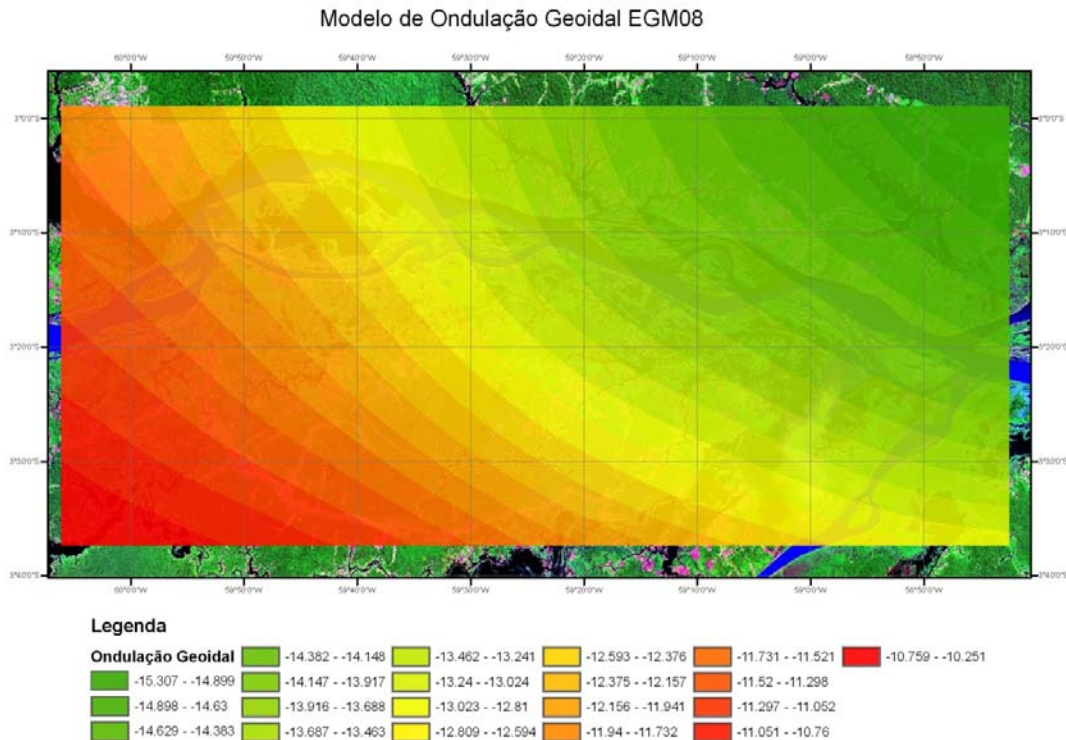
**Figura 2.8- Ondulação Geoidal, (Fonte: Modelo MAPGEO2004).**

Os modelos de geóide globais mais utilizados são o EGM96 (*Earth Gravity Model*) e sua versão mais atual, EGM08. Para o Brasil, existe o modelo MAPGEO2004, desenvolvido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), baseado no modelo EGM96 e disponível no sítio [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo\\_geoidal\\_3.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal_3.shtm).

Esses modelos são alimentados por dados gravimétricos terrestres, por informações de relevo, por dados de altimetria espacial sobre os oceanos, por estações de SLR (*satellite laser ranging*) e pelo sistema DORIS (*Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite*), entre outros componentes. A técnica SLR, em particular, permite que, através de laser, calculem-se as distâncias das estações terrestres para satélites na órbita terrestre, podendo-se, assim, conhecer a variação da posição das plataformas satelitais e, em consequência, as variações no campo de gravidade da Terra. Complementarmente, o sistema DORIS, através do efeito Doppler, consegue também estimar as órbitas dos satélites e suas variações.

O modelo escolhido para ser utilizado neste trabalho foi o EGM08 (Figura 2.9), que conta com 57 meses de dados gravimétricos da missão GRACE (*gravity recovery and climate experiment*), que aduziu significativo aperfeiçoamento em relação ao

modelo anterior EGM06, cuja precisão média era estimada em 50 cm, com uma resolução espacial de arco de 30 minutos (55 km no Equador). Já a versão do EGM08, por sua vez, tem uma precisão média estimada de 15 cm com uma resolução espacial de 5 minutos (9,3 km no Equador) (PALVIS *et al.*, 2008). Os dados do EGM08 podem ser adquiridos na NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*) no seguinte endereço de internet: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>.



**Figura 2.9- Modelo EGM08 e sua ondulação geoidal (em metros) na área de estudo deste trabalho.**

O EGM08 é, atualmente, o modelo de geóide mais indicado para ser utilizado em combinação com dados GNSS e de altimetria por satélites. No entanto, outros modelos, como é o caso do MAPGEO2004, podem oferecer melhores soluções locais. Uma nova versão do MAPGEO, baseado em dados do EGM08, proporcionaria um modelo mais adequado para o território brasileiro.

Lançado em março de 2009, o satélite GOCE (*gravity field and steady-state ocean circulation explore*) também proporcionará novos avanços no conhecimento das ondulações do geóide, enquanto novos modelos certamente serão construídos com a inclusão de seus dados.

### **CAPÍTULO 3 - MOVIMENTOS DA CROSTA TERRESTRE**

Como visto previamente, na busca da validação dos dados obtidos por altimetria por satélites é necessário o estabelecimento de um referencial. Note-se que os referenciais altimétricos, sejam eles ortométricos ou elipsoidais, têm sua posição baseada em uma determinada época.

Nesse sentido, impõe-se compreender que a Terra é um corpo visco-elástico, e sua crosta está sempre sujeita a movimentos, que são causados por uma série de fenômenos físicos. Os movimentos da crosta causam variações temporais nas coordenadas terrestres, tanto na direção vertical quanto horizontal, sendo as variações horizontais mais significativas. Essas variações devem ser compreendidas de forma a permitir as determinações de posição em diferentes épocas, associadas e trabalhadas em conjunto em relação à época em que o referencial foi estabelecido.

Entre os fenômenos que causam variações temporais de coordenadas, destacam-se efeitos de carga sobre a crosta terrestre, alterações no campo gravitacional terrestre devido à atração gravitacional exercida por corpos celestes, movimento das placas tectônicas e eventos sísmicos. Somente recentemente, através de técnicas de geodésia espacial, esses movimentos puderam ser adequadamente mensurados e, em alguns casos, detectados. Hoje, o monitoramento de parte desses fenômenos é realizado pelo IERS (*International Earth Rotation Service*) através de suas convenções descritas em IERS (2003), utilizando informações da rede IGS (*International GNSS Service*), descrita no item 6.2.1, a partir de suas várias estações GNSS e de diferentes técnicas de geodésia espacial (DORIS, VLBI, SLR, entre outras), podendo, a partir da observação temporal de seus dados, fornecer modelos para a correção desses fenômenos, modelos estes que são indispensáveis para o estabelecimento de redes geodésicas de alta precisão e para a compreensão da geodinâmica da Terra.

No estabelecimento de um referencial, a grande parte desses fenômenos é modelada, principalmente os de maiores amplitudes como os efeitos de maré e tectônica de placas. Contudo, efeitos menores, mas também significativos, como, por exemplo, os fenômenos causados por efeito de carga sobre a crosta terrestre, não são inteiramente modelados, devido à dificuldade de compreensão da variação temporal dos fenômenos causadores e também pela dificuldade de estimar sua distribuição espacial com as correspondentes amplitudes. Na questão específica da altimetria espacial, essas variações verticais da crosta devem ser analisadas e monitoradas e, se possível,

modeladas, pois o satélite altímetro não faz parte do mesmo sistema da régua linimétrica. As leituras do satélite percebem essas variações verticais, enquanto a régua no solo desloca-se em conjunto com os efeitos provocados por esses fenômenos.

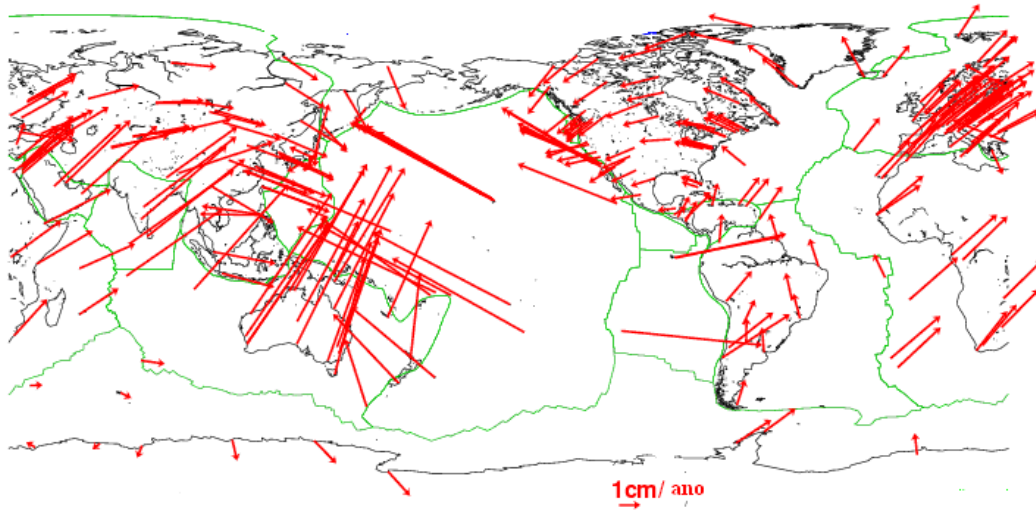
Neste capítulo, serão descritos os principais fenômenos que alteram as coordenadas terrestres e, em consequência, as coordenadas do referencial escolhido, sendo sugeridas formas de corrigir ou atenuar seus efeitos de forma a garantir a qualidade dos dados altimétricos gerados neste trabalho para avaliação da tecnologia de altimetria por satélites.

### **3.1 Movimento das Placas Tectônicas**

A litosfera é composta pela crosta terrestre e por placas rígidas flutuando sobre o manto viscoso, logo abaixo da crosta terrestre. As placas litosféricas estão em constante movimento, colidindo umas com as outras e interagindo ao longo de seus limites, o que resulta na deformação da crosta terrestre. Tal movimento impõe uma variação temporal constante das coordenadas dos pontos localizados sobre a crosta terrestre que podem chegar, horizontalmente, até dez (10) centímetros por ano. Assim, as coordenadas levantadas de um ponto na superfície terrestre estão atreladas à época de levantamento, necessitando de um modelo de velocidades de placas para ter seu valor ajustado à época do sistema geodésico escolhido. Existem diferentes modelos disponíveis para a estimação das velocidades dos movimentos das placas litosféricas, tais como: NNR-NUVEL 1A (No Net Rotation – Northwestern University VELOCITY model 1A) (DeMETS *et al.*, 1994) e o mais recente do ITRF2005 (ALTAMIMI *et al.*, 2007).

O modelo utilizado, neste trabalho, é o ITRF2005, que é usado para inferir o movimento absoluto das placas tectônicas, estimando, assim, suas velocidades angulares. Esse modelo é consistente com o sistema de referência ITRF 2005 utilizado neste trabalho, apresentando melhorias significativas em relação ao modelo do ITRF2000. Para o estabelecimento desse modelo, foi utilizada uma rede de 152 estações geodésicas com dados de diferentes técnicas como DORIS, SLR, VLBI e GNSS; os critérios de utilização dessas estações foram a localização em local rígido e a distribuição ao longo das quinze (15) placas tectônicas, possibilitando, assim, a extração do campo de velocidades dessas estações. No caso de regiões com terremotos durante a época de aquisição de dados, é feita a estimação de velocidade com mensurações antes e depois do terremoto, relevando, dessa forma, uma descontinuidade na exata época do

terremoto (ALTAMIMI, 2007). A Figura 2.10 mostra graficamente a direção e a intensidade dos movimentos realizados pelas placas tectônicas.



**Figura 2.10- Modelo de velocidades de placas tectônicas ITRF2005 (Fonte: ALTAMIMI, 2007)**

Como dito anteriormente, os modelos de velocidades são estimativas dos movimentos absolutos das placas (velocidades angulares de cada placa). Deformações verticais e horizontais, que ocorrem devido à atividade sísmica e a efeitos de subducção entre placas, em particular tendo maiores efeitos nas bordas das placas, não são contempladas, como, por exemplo, o choque da placa NAZCA com a placa Sul Americana (SOAM). NAZCA está penetrando por baixo da placa SOAM, que, por esse efeito, está sendo levantada, criando, então, a cordilheira dos Andes. Trabalhos como RUEGG *et al.* (2009) procuram estimar campos de velocidade horizontais e verticais em regiões de subducção que sofrem com efeito de atividades sísmicas, através do monitoramento da variação das coordenadas das estações geodésicas. Contempla-se, nesse sentido, a importância de redes geodésicas nesse monitoramento e a necessidade de utilizar, como referência, estações cujas coordenadas estejam atualizadas em relação às deformações horizontais e verticais provenientes de efeitos causados por atividades sísmicas.

### 3.2 Maré Terrestre

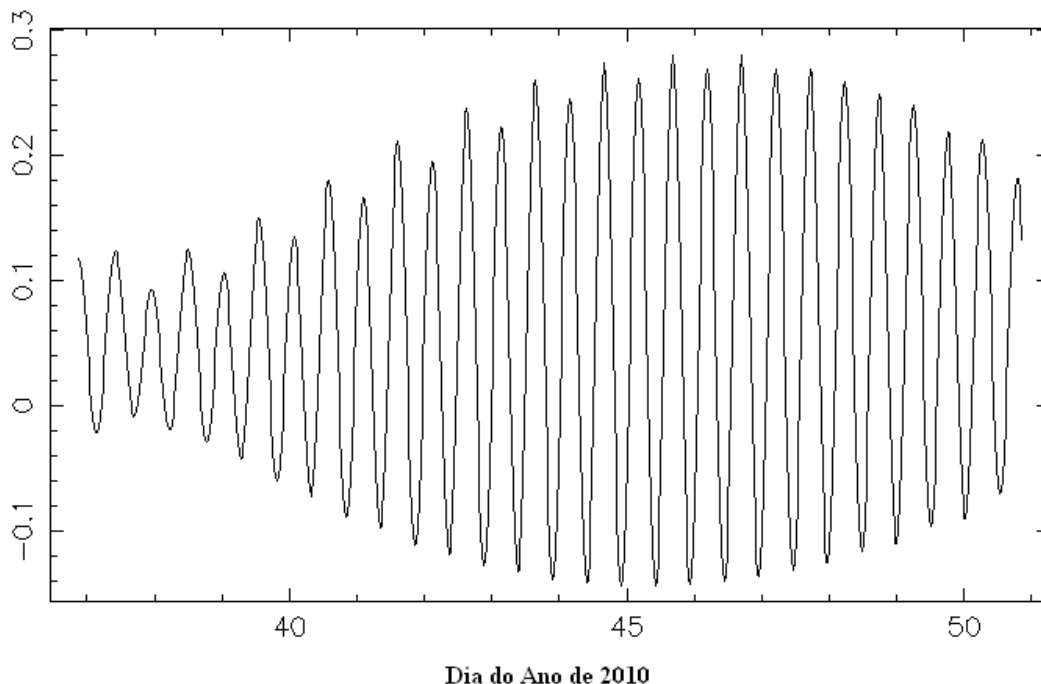
A maré terrestre é um fenômeno de deformação do corpo elástico da Terra, causado principalmente por forças de atração gravitacional do Sol e da Lua. Essa deformação não depende apenas da variação da força de atração, sendo dependente também da estrutura física e de movimentos da Terra (XU, 2007). Efeitos da maré terrestre podem atingir até 40 centímetros de variações na coordenada vertical, sendo os efeitos de maré semi-diurnos e diurnos os mais significativos (MELACHROINOS, 2007).

Entretanto a maré terrestre é um efeito modelável pela teoria da deformação do corpo elástico da Terra, sendo baseado em um modelo da Terra que define as propriedades elásticas e a densidade no interior da Terra (DZIEWONSKI e ANDERSON, 1981) por perturbações no potencial da gravidade da Terra, chamado também de geopotencial. O geopotencial pode ser expresso em harmônicos esféricos (HEISKANEN e MORITZ, 1967), com base também no cálculo dos números adimensionais de Love e Shida, que definem o deslocamento teórico, tanto transversal como radial, da crosta terrestre em função da perturbação do potencial da gravidade da Terra (FARRELL, 1972).

O IERS disponibiliza, em suas convenções (IERS, 2003), o tratamento dos efeitos de maré sólida usando números de Love e Shida para definir a relação entre o potencial de maré e seu deslocamento, sendo dependente da latitude e longitude do ponto, frequência de maré (longo período, diurna e semi-diurna) e do grau de desenvolvimento dos harmônicos esféricos; em geral, o grau dois (2) já elimina grande parte dos efeitos, enquanto, acima do grau três (3), os efeitos são abaixo da escala dos milímetros (WATSON *et al.*, 2006).

A universidade de BERN mantém um serviço via internet pelo seu sítio [http://www.aiub.unibe.ch/content/services/earth\\_tides/index\\_eng.html](http://www.aiub.unibe.ch/content/services/earth_tides/index_eng.html), onde é possível calcular a maré sólida para um determinado ponto de acordo com o padrão do IERS. A seguir, como exemplo, apresenta-se o cálculo executado para a região de Manaus.





**Figura 2.11- Efeito da maré sólida (em metros) na região de Manaus.**

### 3.3 Maré Polar

Os sistemas geodésicos são baseados em uma Terra fixa com seu pólo médio coincidente com eixo Z do elipsóide de referência. O sistema de referência ITRF utiliza a posição do pólo médio da Terra, de variação secular, adotado pelo IERS(2003), através do Centro de Orientação da Terra. Todavia, através de uma série de fenômenos, como principalmente forças de atração do Sol e Lua, ocorre variação de seu eixo de rotação em relação ao eixo de rotação médio utilizado pelo sistema geodésico.

A variação do eixo de rotação causa variação na força centrífuga exercida pelo movimento de rotação, causando, em consequência, variação no geopotencial. Como citado anteriormente, variações no campo gravitacional terrestre são respondidas elasticamente pela crosta terrestre. Nesse sentido, o movimento do pólo é capaz de gerar deslocamento na posição das estações na ordem de alguns centímetros (IERS, 2003).

Em resposta à variação da força centrífuga causada pela maré polar sobre os oceanos, existe um efeito chamado maré polar oceânica, no qual os oceanos, por buscarem uma situação de equilíbrio geopotencial, acabam transferindo massa de um lugar para outro, causando, em resposta, um pequeno movimento do pólo. A amplitude

da oscilação do pólo, causado por maré polar oceânica, é variável, sendo tipicamente da ordem de 0,3 segundo de arco; no entanto, a deformação não é, geralmente, maior do que cerca de 2 milímetros (IERS, 2003).

Apesar de serem efeitos menos impactantes, faz-se necessária a correção desse fenômeno. Nesse sentido, pode-se seguir as convenções do IERS (IERS, 2003), que apresenta normas de correções do movimento de maré polar, sendo disponibilizado um modelo de correções das variações anteriormente citadas em relação ao pólo de referência escolhido para o sistema geodésico ITRF.

### **3.4 Efeitos de Cargas**

A crosta terrestre responde elasticamente a variações da quantidade de carga ou massa que atuam sobre ela. Essas cargas produzem uma deformação na crosta, afetando, principalmente, as coordenadas verticais do lugar. A deformação também influencia as regiões vizinhas do local de aplicação da carga devido à resistência lateral da crosta terrestre. Contudo o seu máximo efeito ocorre na região central de aplicação da carga e, conforme o afastamento, a intensidade reduz-se até que seu efeito não seja percebido. Os efeitos de carga gerados por vários processos geofísicos podem causar movimentos na crosta terrestre e, em consequência, deslocamentos da posição geográfica de feições na área de estudo. Dessa forma, esses deslocamentos devem ser quantificados e modelados, de forma que, em caso de necessidade, sejam removidos das coordenadas a serem calculadas.

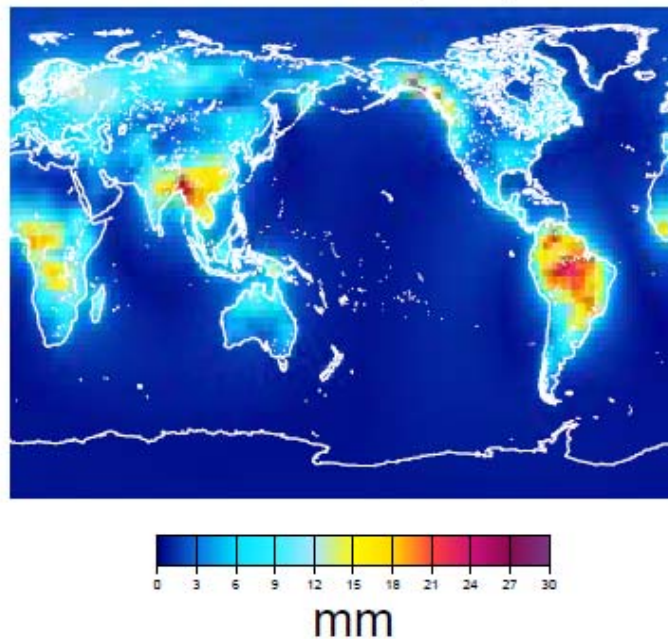
Neste trabalho, são estudadas as variações sazonais provocadas por carga sobre a crosta terrestre, tendo como principais fontes:

- carga de água, oriunda de fenômenos hidrológicos como água subterrânea, umidade do solo, variações de águas superficiais;
- carga oceânica das marés;
- cargas atmosféricas.

As convenções do IERS mostram tratamentos de cargas oceânicas das marés e de cargas atmosféricas, porém não especificam ajustes para cargas de origem hidrológica e para outros tipos de cargas (IERS, 2003).

### 3.4.1 Efeitos de Carga causados por Fenômenos Hidrológicos

A variação da quantidade de água estocada em uma região, correspondente ao ciclo hidrológico terrestre, causa a variação da carga sobre a bacia e sua conseqüente deformação crustal. VAN DAM *et al.* (2001) modelaram os fenômenos de carga hidrológica e quantificaram a amplitude dos efeitos de carga em geral em torno de 1,5 cm, podendo chegar a 3 cm em algumas regiões que experimentam grandes variações de seu estoque de água, como é o caso da bacia Amazônia e de outras bacias tropicais



**Figura 2.12-Deformação vertical causada por carga hidrológica (Fonte:VAN DAM *et al.*, 2001).**

O trabalho de BEVIS *et al.* (2005), com a estação GPS de MANA localizada em Manaus, detectou pontualmente uma amplitude de variação vertical da ordem de 7,5 centímetros, valor quase 3 vezes maior do que o apresentado por VAN DAM *et al.* (2001), e considerou, através de uma modelagem hidrológica simplificada, que esses efeitos são oriundos de carga hidrológica de um raio de até 200 quilômetros da estação. Contudo não houve separação da variação vertical oriunda da carga hidrológica e da carga atmosférica, o que pode levar a distorções causadas por carga atmosférica da ordem de 1,6 mm (Figura 2.13), sendo estas descritas no item a seguir. Como descrito anteriormente, não foram encontradas referências nas convenções do IERS sobre a modelagem e eliminação de efeitos de carga hidrológica, sendo aconselhado o seu

monitoramento através de técnicas de geodésia espacial como GRACE, descrita no item 3.4.5, e GPS, descrita no Capítulo 4.

### 3.4.2 Carga Atmosférica

A variação temporal da massa atmosférica causa deformação da superfície terrestre. Um bom indicador dessa variação é a mudança da pressão atmosférica. DARWIN (1882) já havia percebido que variações do peso da coluna atmosférica, causada por variações de pressão do ar, resultam em deformações crustais. Porém esse fenômeno foi quantificado com sucesso inicialmente usando as tecnologias VLBI e GPS (VAN DAM *et al.*, 1994 e VAN DAM *et al.*, 1994b).

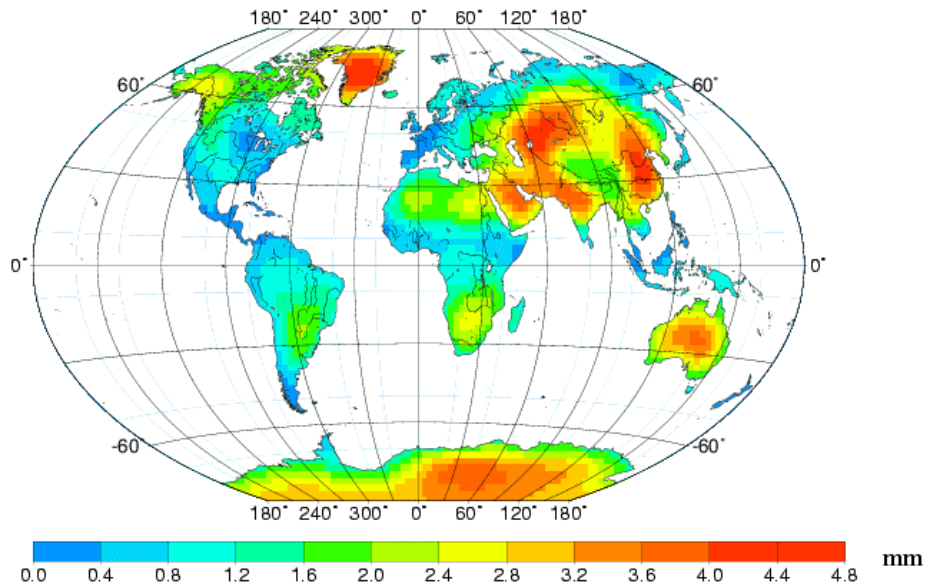
Segundo o IERS variações de 20 hPA (hecto-pascal) foram observadas em latitudes médias, estendendo-se por áreas de 1000 a 2000 quilômetros, com variações temporais de 2 semanas. Os fenômenos de carga atmosférica foram observados e quantificados com possibilidade de atingir variações de 8 mm na horizontal e 25 mm na vertical (IERS, 2003).

Segundo VAN DAM *et al.* (2001), os efeitos de carga atmosférica têm amplitudes maiores em períodos curtos como de 2 semanas e menores em sinais anuais. São maiores em regiões de alta latitude devido ao regime climático intenso e menores em regiões de latitude média e próximas ao oceano devido à resposta barométrica inversa dada pelo oceano.

O IERS sugere correções de carga atmosférica baseada em modelos geofísicos e em modelos empíricos baseados em dados locais. O IERS adotou correções de carga atmosférica baseados em abordagens de modelos geofísicos semelhantes às aplicações de correção de maré sólida, que utilizam números de Love e funções elásticas de FARRELL (1972) e modelos de Terra elástica (DZIEWONSKI e ANDERSON, 1981). No caso de efeitos de carga atmosférica, utiliza-se uma grade definindo globalmente a pressão atmosférica exercida na superfície.

Para a correção de carga atmosférica, pode usar a grade dos modelos atmosféricos como ECMWF (*European Centre of Medium-range Weather Forecasts*) e NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), que possuem uma grade de 2.5 x 2.5 graus, fornecendo dados a cada 6 horas da pressão atmosférica na superfície de todo o

globo (IERS, 2003). A seguir, segue o exemplo, na Figura 2.13, da amplitude da deformação crustal anual calculada a partir de dados NCEP.



**Figura 2.13- Amplitude anual de deformação crustal causada por contribuição de variação de pressão atmosférica com dados NCEP (Fonte: BIANCALE, 2002).**

### 3.4.3 Carga Oceânica das Marés

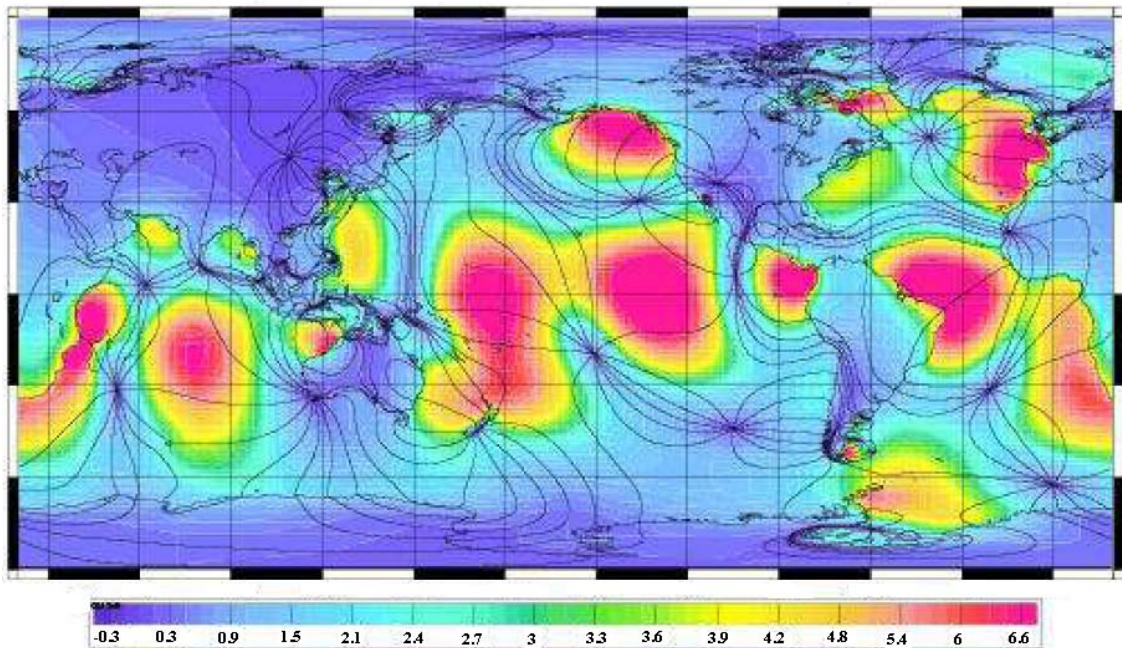
As marés oceânicas causam variação de carga sobre a superfície terrestre. Em consequência, a variação de carga sobre uma determinada região do oceano causa deformação da crosta terrestre. Apesar do efeito de carga incidir apenas sobre os oceanos, esse efeito, devido à resistência lateral da crosta, propaga-se no seu interior, tendo maior efeito quanto maior a proximidade da costa. Sendo assim, seus efeitos são dependentes da posição geográfica da estação, podendo ter seus efeitos de deslocamento na ordem de dez (10) centímetros na vertical e três (3) centímetros na horizontal (PEROSANZ, 2006). Em regiões afastadas da costa, esse valor decresce, mas ainda pode alcançar um (1) centímetro para uma distância oceano-estação da ordem de mil (1000) quilômetros.

O IERS (2003) sugere correções baseadas em modelos de maré oceânica como o GOT99 (*global ocean tide 1999*) (RAY, 1999) e o FES99 (*finite element solutions 1999*) (LEFEVRE *et al.*, 2002), sendo, geralmente, as marés oceânicas modeladas, em quase sua totalidade de efeitos, em 11 tipos de maré, com quatro (4) semi-diurnas (M2,

S2, N2, K2), quatro (4) diurnas (K1, O1, P1, Q1) e três (3) de longo período (Mf, Mm, Ssa). O principal efeito na maioria dos locais é causado pela maré lunar semi-diurna M2, que pode ser observado na Figura 2.14, com duração aproximada de 12 horas e 25 minutos.

Os efeitos de carga oceânica podem ser computados com aplicações similares ao fenômeno de maré sólida, usando a relação dada pelos números de Love e funções elásticas de FERREL (1972) descritas no item 3.2, que descrevem, assim, o potencial da carga gerada definida pelo modelo de maré e o deslocamento em um modelo de Terra elástica.

Para correção, pode-se usar, também, o modelo de maré mais atualizado em relação às normas do IERS (2003), sendo este modelo o FES2004 (LYARD *et al.*, 2006), um modelo de marés baseado em modelagem hidrodinâmica, em dados de altimetria espacial e em dados de marégrafos.



**Figura 2.14 - Carta global da amplitude da maré M2 e de seu efeito de carga oceânica em centímetros (Fonte: LEGOS apud PEROSANZ, 2006).**

### 3.4.5 GRACE- (Gravity Recovery and Climate Experiment)

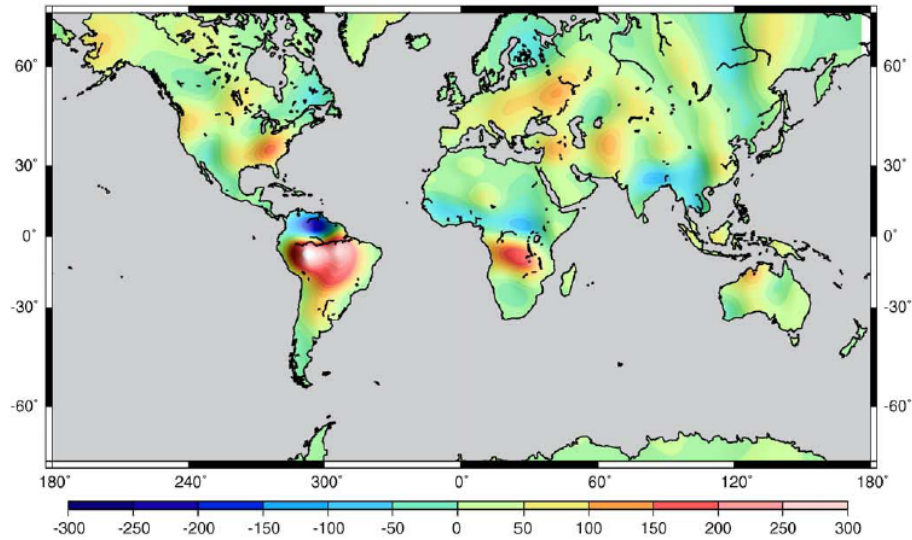
As variações verticais da crosta terrestre estão correlacionadas com a variação do campo de gravidade terrestre. Dessa forma, o uso de dados gravimétricos pode auxiliar a interpretação dos movimentos verticais e de sua distribuição espacial.

Uma importante contribuição, nesta questão, é o uso dos dados da missão GRACE lançada em março de 2002. A missão GRACE (TAPLEY *et al.*, 2004) consiste em dois satélites quase idênticos, de mesma órbita polar, separados por uma distância de aproximadamente 220 quilômetros e com aproximadamente 500 quilômetros de altitude. Os satélites são capazes de fazer um mapeamento da variação da gravidade terrestre, baseado nas variações das distâncias entre os satélites. Quando detectada uma região com maior atração gravitacional, uma atração mais forte é experimentada por um dos satélites, acarretando um afastamento maior entre os dois satélites. Essas medidas de distância são realizadas pelo sistema GPS e por acelerômetros capazes de detectar a variação da distância entre os satélites com precisão equivalente a um (1) micron (NASA, 2003). Baseado nesse método, os dois satélites, após várias passagens numa mesma região, são capazes de detectar pequenas variações de gravidade em um mesmo ponto.

Como visto anteriormente, alterações no campo gravitacional da Terra são respondidas elasticamente pela crosta terrestre. Nesse sentido, o GRACE é uma ferramenta útil para estimar as variações gravitacionais provocadas por efeitos não modelados como variações de cargas hidrológicas. Recentes trabalhos vêm dando ênfase na aplicação dos dados gravimétricos na estimativa de carga hidrológica e deflexão crustal.

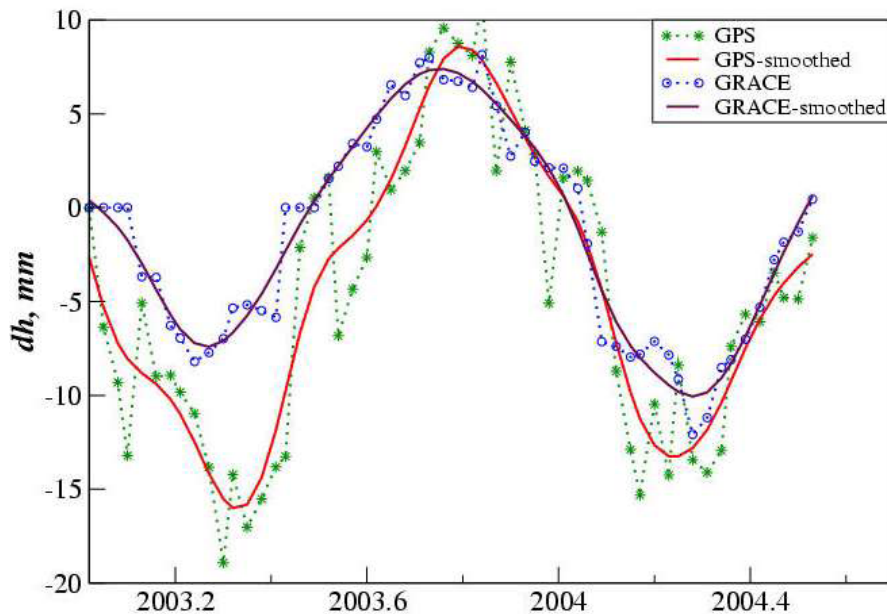
No trabalho de RAMILLEN *et al.*(2005), utilizaram-se as séries GRACE e, a partir das variações de gravidade e aplicações de alguns dos modelos de correção vistos anteriormente, é possível extrair, da variação total de gravidade medida, a parcela causada apenas por variações de carga (massa). Considerando que as variações de massa são causadas principalmente pelo ciclo hidrológico, conseguiu-se estimar as variações de massa de água descritas na Figura 2.15.





**Figura 2.15-Variações de armazenamento de água no mês de abril em mm (Fonte: RAMILLEN *et al.*, 2005).**

No trabalho de FAZILOVA *et al.*(2006), a variação de gravidade também pode ser utilizada na aplicação de harmônicos esféricos do potencial gravitacional terrestre e, juntamente com os números de Love, podem ser estimados os deslocamentos verticais causados pela variação de carga na superfície terrestre, conforme descrito na Figura 2.16.



**Figura 2.16- Variação vertical da estação de BRAZ do IBGE/IGS, incluindo comparação com o deslocamento vertical derivado dos dados da missão GRACE (FAZILOVA *et al.*, 2006).**



Devido ao sucesso das aplicações descritas acima, o GRACE juntamente com a tecnologia GPS, descrita no próximo capítulo, são abordagens úteis no monitoramento das variações verticais da crosta terrestre e auxiliam, dessa forma, na manutenção do referencial altimétrico necessário para avaliação da tecnologia de altimetria espacial.

Entretanto as séries do GRACE são apenas capazes de estimar as variações verticais e ainda através da utilização de uma série de procedimentos. Para a posição absoluta e de forma direta, é necessário usar técnicas mais apuradas como o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Entretanto, o GRACE ainda é uma ferramenta altamente válida devido à sua capacidade de permitir obter dados para qualquer região da superfície terrestre, servindo, neste trabalho, como base de comparação com métodos de processamento dos dados GPS que serão descritos no Capítulo 5.

## **CAPÍTULO 4 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)**

Neste Capítulo, serão abordados conceitos sobre GPS (*global positioning system*), a tecnologia escolhida para auxiliar na avaliação de dados de altimetria espacial.

Atualmente, utiliza-se a sigla GNSS (*global navigation satellite system*) para descrever os sistemas baseados em satélites artificiais que proporcionam dados de navegação em tempo real e posicionamento geográfico. Sob o conceito de GNSS, está compreendida a aplicação de todos os sistemas de posicionamento terrestres por satélite, inclusive o sistema GPS, em conjunto com os satélites russos GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) e futuramente com os sistemas europeu GALILEO e chinês COMPASS. Entretanto, neste trabalho, apenas será abordado o uso do GPS.

O GPS é baseado no sistema NAVSTAR-GPS (*navigation system with time and ranging – global positioning system*), concebido, em 1973, pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, a fim de complementar e posteriormente substituir o sistema TRANSIT/NNSS (*navy navigation satellite system*), que possuía limitações na navegação e no posicionamento. O sistema TRANSIT foi criado em 1963 e, posteriormente, desativado no ano de 1993. O propósito foi de criar um sistema capaz de prover o posicionamento tridimensional, a velocidade e informações precisas de tempo, independente de condições meteorológicas (SEEBER, 2003). O sistema GPS é baseado em três segmentos, a saber: espacial, controle e usuários.

O segmento espacial é baseado em uma constelação de 24 satélites artificiais ativos distribuídos em seis planos orbitais, com uma altura orbital média de 20.200 km, inclinados de 55° em relação ao plano do Equador com um período orbital de 12 horas siderais, de modo que existam pelo menos quatro satélites em cada plano orbital e sejam, assim, visíveis simultaneamente acima do horizonte, em qualquer lugar da superfície da Terra, e em qualquer instante (SEEBER, 2003). No momento, existem 30 satélites operacionais da constelação GPS, identificados pela sigla SVN (*space vehicle number*). Entre esses satélites, não há qualquer remanescente oriundo do primeiro lançamento em 1978. Destaca-se, ainda, que o sistema só ficou completamente operacional ao se atingir o número de 24 satélites no meio dos anos 90 do século passado. Dos atuais satélites, encontram-se 11 satélites do bloco IIA, lançados entre 1990 e 1997, 12 do bloco IIR, lançados entre 1997 e 2004, e mais 7 do Bloco IIR-M, lançados entre 2005 e 2009. Os satélites do sistema GPS operam nas frequências L1=1575,42 MHz e L2=1227,60 MHz. Na frequência L1, são modulados o código

preciso P e o código C/A, enquanto, na frequência L2, o código P. Nos satélites do bloco IIR-M, conta-se ainda com o código civil L2c, que ajudará em algumas limitações do código L1 C/A, como redução na interferência e uso do GPS em ambientes fechados. O bloco IIR-M conta, também, para fins militares, com o código-M, modulado nas frequências L1 e L2 (MELACHROINOS, 2007).

O segmento de controle é formado por estações de monitoramento espalhadas pelo globo (Colorado Springs, Ascencion, Kwajalein, Hawaii e Diego Garcia). A estação mestra MCS (*master control station*), localizada na base Schriever da Força Aérea dos Estados Unidos, em Colorado Springs, fica a cargo de receber as informações dos satélites adquiridas pelas demais estações. Baseado nessas estações, a estação mestra atualiza informações nos satélites, como o ajuste e a sincronização dos relógios atômicos a bordo dos satélites e ajuste das efemérides, incluindo órbitas ou posição dos satélites. Cada satélite GPS deve ser monitorado por três (3) ou mais estações de monitoramento.

O segmento de usuários é composto pelos milhões de usuários utilizadores e pelos equipamentos receptores, códigos computacionais e algoritmos da tecnologia GPS, seja para uso militar, uso científico ou outros fins.

#### **4.1 Observáveis do Sistema GPS**

As variáveis observáveis básicas do sistema de posicionamento global são as pseudo- distâncias e a fase da portadora (XU, 2007).

As pseudo-distâncias são medidas de distância entre a antena do satélite GPS e a antena do receptor GPS. O termo pseudo é utilizado pelo fato de que a distância medida não é realmente a distância geométrica entre satélite e receptor, já que a medida da distancia é baseada no tempo entre emissão do sinal GPS enviado pelo satélite e no tempo de recepção do sinal pelo receptor. O tempo de propagação do sinal é de aproximadamente 0,007 segundo. Sendo assim, a distância está sujeita a perturbações ou incertezas a partir dos erros produzidos nas medições por ambos os relógios (satélite e receptor). Adicionalmente, o caminho percorrido pelo sinal sofre uma série de interferências a serem consideradas no procedimento de correção geométrica, que incluem efeitos de refração atmosférica durante a propagação de seu sinal e efeitos da rotação da Terra, produzindo distorções de aproximadamente 15 arcos de segundo por cada segundo de tempo durante a propagação do sinal.

As fases da portadora são medidas de fase do sinal recebido do satélite relativa à fase da portadora gerada no tempo de recebimento. As medidas de fase são resolvidas sobre comprimentos de onda de 19 cm para L1 e de 24 cm para L2, o que proporciona uma resolução a nível milimétrico, tornando as medidas de fase mais precisas do que as outras. Todavia o número de ciclos iniciais entre o satélite e o receptor, no período inicial do rastreamento, não pode ser estimado, gerando, assim, uma incógnita chamada de ambigüidade que corresponde a esse número inteiro de ciclos. Devido a essa incógnita, as medidas de fases têm restrições em aplicações em tempo real.

Três sistemas de tempo são utilizados em estudos com satélites, discriminados em tempo dinâmico, sideral e atômico (XU, 2007). O primeiro sistema abrange o tempo dinâmico, de escala uniforme, usado para descrever o movimento de corpos em campos gravitacionais. O segundo sistema diz respeito ao tempo sideral, que descreve a rotação da Terra, e que, devido à velocidade de rotação não ser constante, apresenta escala de tempo não constante, enquanto o terceiro sistema engloba o tempo atômico, que é um sistema de tempo mantido por relógios atômicos, expresso pela sigla TAI (*international atomic time*). O sistema GPS utiliza o tempo atômico, porém tendo uma defasagem constante de 19 segundos em relação ao TAI (MONICO, 2000). O sistema de tempo GPS deve ser precisamente definido, pois, a partir dele, será medido o tempo da propagação do sinal e a época a que se resume a medição.

#### **4.2 Erros e Efeitos envolvidos nas Observações GPS**

O posicionamento por GPS, como qualquer outra técnica de medição, sofre uma série de efeitos que implica a introdução de erros no processamento das coordenadas. Esses erros devem ser reduzidos ou eliminados durante o processamento dos dados através de modelagem e técnicas de observação. Os erros envolvidos nas observações GPS podem ser divididos em erros provenientes dos satélites, erros na propagação do sinal, erros do receptor/antena e erros da própria estação. Dentre as principais fontes de erros, detalhados nas seções subseqüentes do texto, pode-se destacar:

- erro na órbita do satélite;
- erros no relógio receptor e do satélite;
- refração troposférica;
- refração ionosférica;

- centro de fase da antena;
- efeito multicaminho;
- perdas de ciclos.

#### 4.2.1 Erro de Órbita do Satélite

A determinação de posição do satélite afeta diretamente a medida da distância entre o satélite e a estação, influenciando, conseqüentemente, o resultado das coordenadas a serem determinadas.

Os erros de órbita afetam, em maior escala, o posicionamento absoluto e, em menor escala, o posicionamento diferencial. Esse erro no posicionamento diferencial guarda dependência em relação ao comprimento da linha de base. As efemérides transmitidas durante as observações têm um erro estimado de cem (100) centímetros, porém pode-se utilizar as efemérides disponíveis junto a organizações como o IGS (Serviço Internacional GNSS), que disponibiliza, em seu endereço eletrônico, órbitas precisas que podem ser obtidas doze (12) dias após as efemérides transmitidas e com uma precisão melhor que 2,5 cm. Com vistas a atender a necessidade de rapidez no processamento do cálculo, podem ser utilizadas as efemérides ultra-rápidas, que estão disponíveis 15 minutos após as aquisições das efemérides transmitidas.

O sistema geodésico utilizado nas efemérides instantâneas é o WGS84 (*world geodetic system* 1984), estabelecido pelo Departamento de Defesa americano com o objetivo de fornecer posicionamento e navegação em qualquer parte do mundo. O ITRF é utilizado como refinamento do WGS84. Atualmente, as diferenças entre os sistemas encontram-se na ordem do centímetro (cm). Por meio do ITRF, utiliza-se o elipsóide GRS-80 (*geodetic reference system* 1980), que possui uma pequena variação no achatamento terrestre em relação ao WGS84 ( $f_{WGS84} = 1/298, 257223563$ ,  $f_{GRS80} = 1/298, 257222101$ ) (VASCONCELLOS, 2003).

#### 4.2.2 Erros de Relógio do Satélite e Receptor

Um erro de 1 nanosegundo resulta em 30 cm de erro de distância entre o satélite e o receptor. Por esse motivo, os satélites são equipados com relógios atômicos, que são freqüentemente ajustados pelas estações de controle tendo uma precisão instantânea de 2,5 nanosegundos. O IGS fornece correções para os relógios dos satélites com precisão

de 0,02 nanosegundo. Por outro lado, os relógios dos receptores possuem menor precisão, sendo sincronizados com os relógios dos satélites e demandando um mínimo de quatro (4) satélites rastreados para poder se obter a sincronia. Maior a precisão quanto mais rastreados forem os satélites. Como na questão das órbitas, os erros de relógio afetam mais o posicionamento absoluto, podendo ser até eliminados em técnicas diferenciais como a dupla diferença de fase (MONICO, 2000), descrita no Capítulo 5.

#### **4.2.3 Erros de Antena**

O centro de fase da antena de receptores GPS muda de acordo com a frequência utilizada, com a elevação e azimute do satélite observado. Portanto, para o posicionamento de alta precisão, devem ser utilizadas antenas modeladas, sendo que a calibração delas é feita pelo Serviço Geodésico Nacional dos Estados Unidos (NGS-*National Geodetic Survey*) com relação à antena Dorne Margolin. O IGS disponibiliza um arquivo chamado *antex*, que possui correções do centro de fase e dimensões das antenas relacionadas à posição do ponto de referência das antenas (ARP). As antenas devem ser alinhadas com o norte verdadeiro de forma a padronizar as medições em diferentes estudos e de modo que a localização do centro de fase da antena seja modelado corretamente.

Nos satélites, existe um erro de ajuste (*wind-up*), concernente à posição das antenas nos satélites, geralmente, orientadas para o norte. Devido a algumas necessidades de movimento do satélite para ajuste da posição de seus painéis solares, a orientação das antenas pode mudar, gerando erros de alguns decímetros.

#### **4.2.4 Refração Ionosférica**

A refração ionosférica é uma das grandes causas no erro das medições GPS, sendo que esse erro pode variar de poucos metros a mais de 20 metros em um dia.

A ionosfera é uma região da atmosfera entre 50 a 1000 quilômetros acima da superfície terrestre, seus efeitos causam um erro de atraso na propagação do sinal GPS, com grandeza diretamente proporcional ao TEC (*total electron content*– conteúdo total de elétrons) na camada ionosférica. A maior dificuldade de correção da refração ionosférica é sua variação no tempo e no espaço devido a uma série de condições como o fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do

ano, hora do dia, localização geográfica e direção do raio vetor do satélite (AGUIAR e CAMARGO, 2006).

Para correção de efeitos da ionosfera, pode-se utilizar mapas disponibilizados pelo IGS em arquivos no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*), que fornecem valores de TEC na direção vertical com resolução espacial de 5 x 2,5 graus para cada 2 horas. Em receptores GPS de dupla frequência (L1 e L2), pode-se empregar uma combinação linear entre as frequências L1 e L2, chamada de L3, a fim de remover os efeitos ionosféricos. Contudo essa combinação apenas elimina efeitos de primeira ordem. Os efeitos de segunda ordem e de terceira ordem estão na faixa de 1,6-3,3 cm e 0,86-2,4 mm para as frequências L1 e L2, respectivamente. Esses erros de segunda e de terceira ordem podem ser eliminados no algoritmo de resolução das diferenças de fase (MELANCHROINOS, 2007). Futuramente, o sistema GPS utilizará uma terceira frequência chamada de L5, que permitirá reduzir os efeitos de segunda ordem da ionosfera, entre outras aplicações, e espera-se que, em 2015, esteja completa a constelação GPS com observáveis disponíveis em três (3) frequências (MELANCHROINOS, 2007).

#### **4.2.5 Refração Troposférica**

A refração troposférica causa atraso na propagação do sinal GPS, podendo chegar a 30 metros de erro devido ao atraso. A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera, estando diretamente sobre a superfície terrestre, chegando até a 40 km de altitude.

O erro de atraso troposférico é separado por duas componentes, geralmente, pelo tipo de contribuição, sendo uma chamada de troposfera seca, composta por gases secos e também chamada de componente hidrostática, enquanto a outra constitui a componente úmida, chamada de troposfera úmida, composta por vapores de água. Os erros de atraso são em função da elevação do satélite e de condições atmosféricas, como temperatura, umidade e pressão atmosférica (NIELL, 1996).

Diferentemente da ionosfera, os erros troposféricos são independentes da frequência utilizada. Portanto, não podem ser reduzidos através de combinações lineares de suas frequências. Na tentativa de eliminar erros oriundos da passagem do sinal pela troposfera, pode-se utilizar apenas as observações de satélites com ângulos acima de 15 graus, reduzindo a passagem do sinal pela troposfera, conjuntamente aplicando técnicas

de posicionamento diferencial com bases curtas (receptor de referência em distâncias de até 10 km) (MONICO, 2000).

Segundo o IERS (2003), existem vários modelos que determinam o atraso troposférico, sendo que eles utilizam condições meteorológicas do ponto observado. Todos têm aproximadamente a mesma precisão, sendo considerado, a partir de resultados preliminares, o modelo *Saastamoinen* como a melhor opção no momento, sendo capaz de modelar bem a troposfera seca, que é relativamente uniforme, e causa 90% dos efeitos da refração. Já a troposfera úmida é de difícil modelagem, pois é difícil integrar a variação do vapor de água com a variação de altura.

Portanto, recomenda-se a utilização de um modelo representando as condições meteorológicas. Modelos numéricos de tempo como ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) e NCEP (*National Center for Environmental Prediction*) podem ser usados para obtenção dos parâmetros tanto de troposfera seca quando úmida, de forma a mapear espacialmente os efeitos da refração da troposfera (MELACHROINOS, 2007).

#### **4.2.6 Perda de ciclos**

Durante o rastreamento de sinais GPS, o receptor pode perder momentaneamente o sinal de um satélite GPS. Essa perda de sinal pode acontecer devido a várias condições como obstrução do sinal por obstáculos no caminho do sinal, ruídos, efeitos atmosféricos e variações da posição da antena (VASCONCELLOS, 2003). Quando ocorre a perda do sinal GPS, pode haver perda da contagem de ciclos inteiros no receptor, chamada de *cycle slips*. Essa perda de ciclos causa problemas na solução das ambigüidades e deve ser removida através de algoritmos no pré-processamento dos dados.

#### **4.2.7 Multicaminho**

Os sinais de um satélite GPS recebidos pelo receptor, quando encontram obstáculos, podem não ser obstruídos. Esses obstáculos podem se comportar como uma superfície refletora, causando um desvio na direção do sinal com a ampliação da distância percorrida que seria normalmente esperada. A esse efeito, atribui-se o nome multicaminho, uma vez que um sinal chega à antena do receptor por caminhos múltiplos



devido à reflexão. Normalmente, ocorre quando se instala a antena do receptor próximo a superfícies refletoras como espelhos de água, superfícies metálicas e paredes telhados.

O uso de antenas apropriadas, que recebem apenas sinais polarizados da mesma forma que os sinais emitidos pelos satélites, reduz esses efeitos, o que se justifica pelo fato do sinal refletido ter sua polaridade invertida (VASCONCELLOS, 2003). Evitar a instalação de antenas perto e obstáculos com elevação maior do que 10 a 15 graus em relação ao plano horizontal da antena do receptor também ajuda a reduzir os efeitos de multicaminho.

## CAPÍTULO 5- METODOLOGIA

A partir deste ponto do trabalho, esboça-se o arcabouço metodológico para tratar da questão central do estudo concernente à avaliação e aperfeiçoamento das cotas fluviométricas obtidas por satélites orbitais. Destaca-se que a dissertação enfoca a geração de dados de campo através de receptores GNSS com vistas a tornar possível a aplicação da altimetria espacial no monitoramento ambiental e hídrico, com possibilidades de desenvolvimento de estudos hidráulico-hidrológicos na escala da bacia hidrográfica.

Na seqüência, são discutidos, de forma breve, os procedimentos empregados no processamento dos dados de receptores GPS e de outros produtos como dados do satélite gravimétrico GRACE, modelo de geóide EGM08 e medições de ADCP, entre outros, que ajudaram na análise dos resultados obtidos por receptores GPS apresentados no Capítulo 7. Esses procedimentos estão melhor detalhados na Figura 5.1 e nos itens subseqüentes.

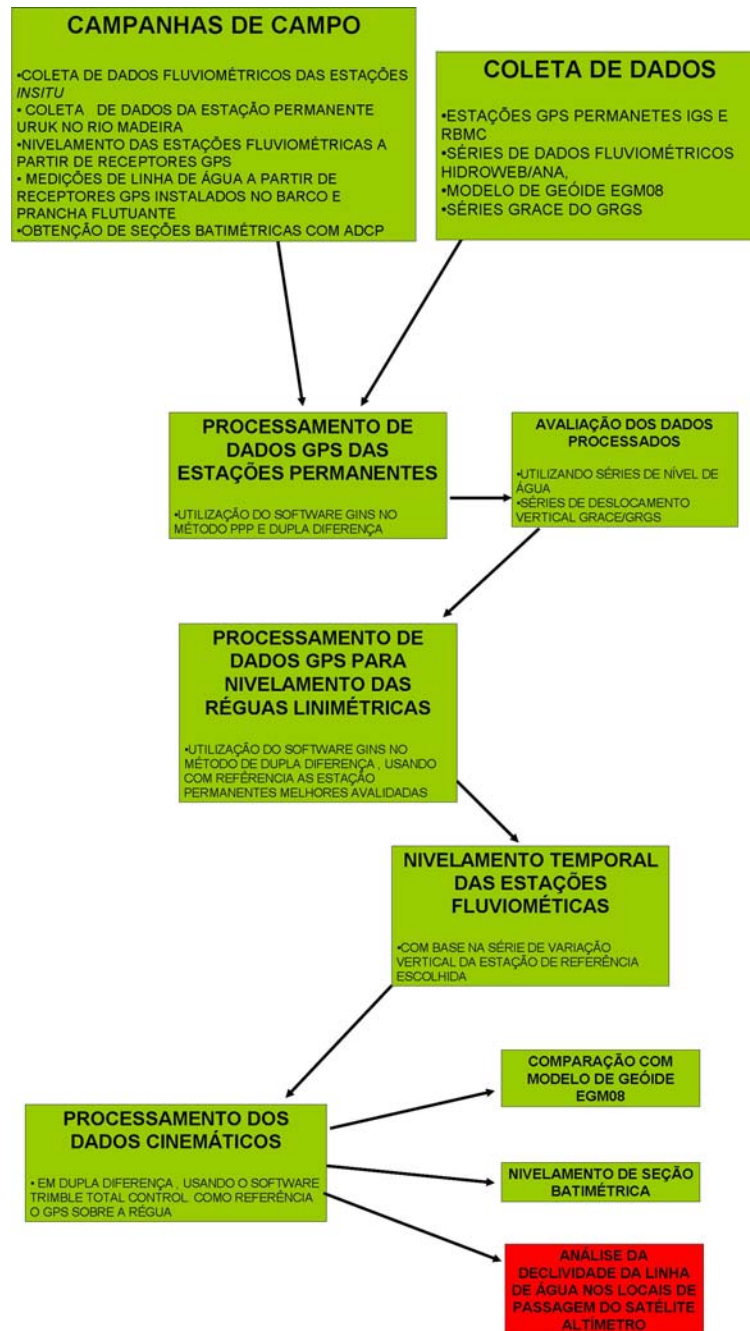
Como ferramenta principal, foram utilizados os dados de receptores GPS. A partir de dados GPS, serão estabelecidos o referencial altimétrico e a manutenção desse referencial a nível centimétrico em uma região com a problemática da Amazônia, com dificuldade de acesso às estações hidrológicas para obtenção de dados de GPS. Com esparsas estações permanentes GPS, alguns dos sítios são afetados por mais de 10 centímetros de variações de deslocamento vertical causadas por efeitos de carga hidrológica, conforme anteriormente mencionado no trabalho de BEVIS *et al.* (2005). A partir do referencial altimétrico obtido através das estações permanentes GPS, serão niveladas as estações fluviométricas garantindo, assim, a mesma referência altimétrica para os dados fluviométricos e para os dados de altimetria espacial, sendo também realizados perfis da altura da linha de água de forma a obter a declividade da linha de água nos locais de passagem do satélite altímetro.

Dados do satélite GRACE também serão usados de forma a demonstrar a concordância com as soluções GPS, auxiliando na escolha dos métodos de processamento GPS. A partir dos resultados, serão geradas expectativas de futuras aplicações do GRACE em outras regiões.

Em complementação, também foi utilizado o modelo de ondulação geoidal EGM08, com objetivo futuro de dar significado físico às medições GPS e de altimetria

espacial, sendo avaliada a sua aplicação em relação à consistência com as propriedades hidrodinâmicas dos cursos de água em estudo.

Finalmente, considera-se relevante destacar o conjunto de campanhas conduzidas para atingir o objetivo da dissertação segundo a abordagem metodológica proposta. Foram nove (9) campanhas, descritas no Capítulo 6, que englobaram os tipos de dados experimentais coletados. A Figura 5.1 sintetiza a abordagem metodológica adotada nesta dissertação.



**Figura 5.1- Fluxograma metodológico para a qualificação do dado altimétrico.**

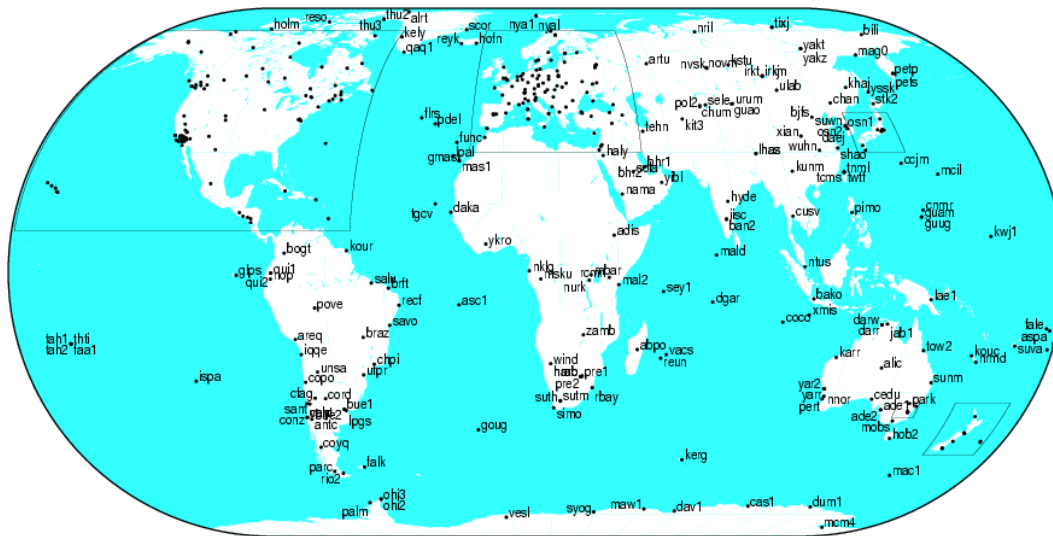
Nas seções seguintes, detalham-se os diversos procedimentos que compõem o fluxograma da Figura 5.1, procurando dar suporte e fundamentar as opções feitas na definição metodológica do trabalho.

## **5.1-Estações permanentes GNSS**

As estações permanentes GNSS foram fundamentais para execução deste trabalho. Através delas, puderam ser adquiridos dados de observações dos receptores GPS na área de influência do presente estudo, o que possibilitou avaliar efeitos de carga, ajuste de outras estações permanentes e nivelamento de réguas linimétricas por receptores GPS. Neste trabalho, foram usados dados de receptores GPS das redes Internacional IGS e da rede nacional RBMC do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), sendo essas redes descritas a seguir.

### **5.1.1- Rede IGS (Serviço Internacional GNSS)**

O IGS é uma organização civil existente há mais de 15 anos e que conta com a participação de mais de 200 organizações de mais de 80 países espalhadas pelo globo. O objetivo principal do IGS é reunir dados de estações GNSS e gerar produtos GNSS, tais como órbitas e relógios precisos, de melhor qualidade para a comunidade civil GNSS (DOW *et al.*, 2005). Os produtos gerados no IGS têm como objetivo dar suporte às atividades científicas e à extensão e ao melhoramento do ITRF, mantido pelo Serviço Internacional de Rotação da Terra (IERS), determinando órbitas de satélites científicos e monitoramento da troposfera e ionosfera. A rede IGS é composta por mais de 400 estações descritas na Figura 5.2 espalhadas pelo globo, seguindo rigorosas regras para homologação de suas estações, tais como a estabilidade do local, qualidade de antena e receptores, taxa de aquisição de 30 segundos, envio de dados diariamente para o servidor IGS, e outras características sobre a configuração de aquisição dos dados. Dentre as estações do IGS, 60 delas também possibilitam navegação em tempo real como parte do projeto *Real Time Pilot Project* (RT-PP) (DROW *et al.*, 2009).

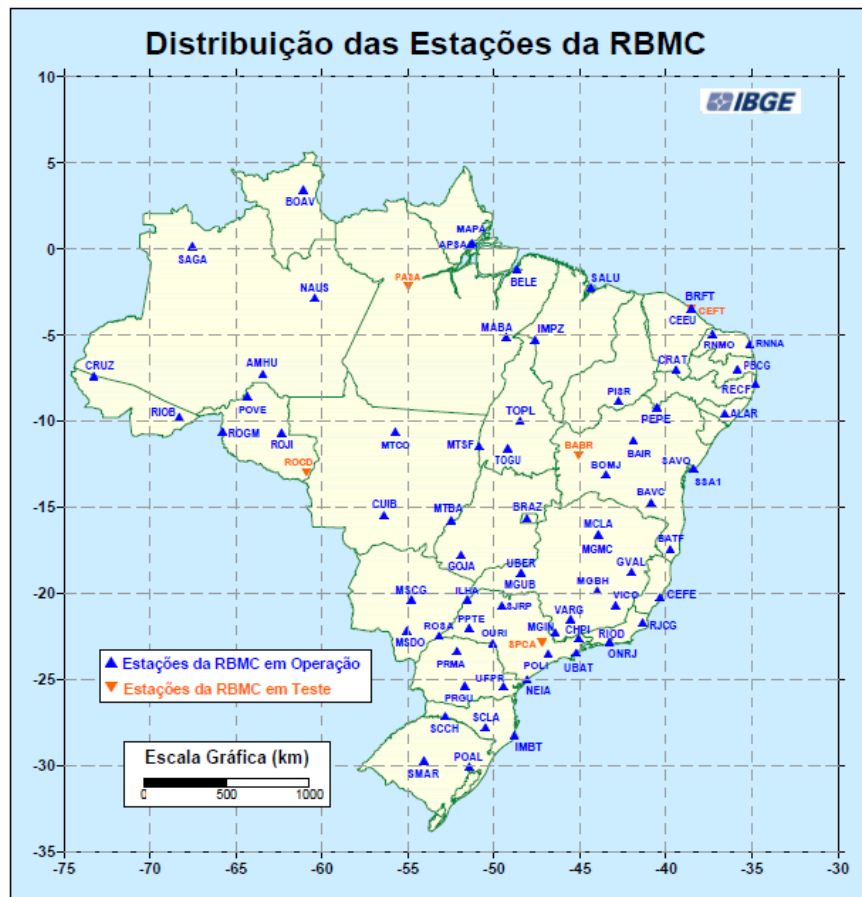


GM7 2010 Feb 19 16:49:15

Figura 5.2- Estações GNSS da Rede IGS (Fonte:DROW *et al.*, 2009).

### 5.1.2 RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo)

O Brasil possui uma rede de monitoramento GNSS sob gestão do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), estabelecida com o objetivo de atender à comunidade usuária GNSS em levantamentos diferenciais, sejam eles cinemáticos ou estáticos. Além disso, suas estações servem como referência para materializar o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS) e para aplicações tais como estimativas de velocidades da placa sul-americana, modelagem da ionosfera e refinamento do mapa geoidal do Brasil (FORTES e GODOY, 1991). A RBMC contribui também para a rede IGS, cedendo dados das suas estações de Brasília, Fortaleza e Presidente Prudente.



**Figura5.3- Distribuição das estações da RBMC (Fonte: sítio IBGE, [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)).**

O IBGE disponibiliza, em seu sítio na internet, os dados de sua rede na taxa de observação de 15 segundos e mantém um sistema chamado RBMC-IP, onde é possível adquirir dados em tempo real na frequência de 1 segundo, o que possibilita aplicações GNSS em tempo real e aquisição de dados em frequências melhores adaptadas a soluções GPS cinemáticas, as quais exigem tratamento de dados GPS com estações em movimento, como, por exemplo, levantamentos GPS sobre o barco apresentados durante este trabalho.

## 5.2 Processamento dos Dados GPS

Durante o presente trabalho, foram adquiridas várias quantidades de dados obtidos de receptores GPS. As observáveis adquiridas por receptores GPS (Capítulo 4, item 4.1) representam as informações relacionadas com a distância e medidas de fase do centro de fase da antena do receptor para os vários satélites GPS observados, fazendo-se

necessário que esses dados sejam processados de forma a estabelecer as coordenadas geodésicas dos diversos dados utilizados neste trabalho como, por exemplo, dados das estações GPS permanentes, levantamentos por receptores GPS com ocupação e re-ocupação de referências de nível das régua linimétricas e dados de receptores GPS em modo cinemático (móveis) a bordo do barco e pranchas flutuantes.

Para o processamento dos dados GPS, foram escolhidas as observáveis das medidas de fase (Capítulo 4, item 4.1), sendo escolhidos os métodos de posicionamento por ponto preciso (PPP) e dupla diferença de fase para determinação das coordenadas das estações, sendo esses métodos descritos a seguir.

### **5.2.1 Método da Dupla Diferença de Fase**

O método da dupla diferença de fase é baseado na utilização da diferença simples da observação de fase de duas estações para dois satélites. Nessa técnica, devido a observações simultâneas, elimina-se os erros dos relógios dos satélites e receptores (VASCONCELLOS, 2003). Geralmente, utiliza-se essa técnica com uma estação de coordenada conhecida fixa, permitindo ajustar, então, a outra estação. No caso, quanto menor a distância (linha de base) entre as estações, maior é a redução dos efeitos de atmosfera e dos efeitos de carga, pois pode-se considerar que as duas estações estão quase sob as mesmas condições físicas, o que é muito importante quando se empregam receptores de mono-freqüência devido a impossibilidade da combinação de freqüências para eliminação dos efeitos de primeira ordem da refração ionosférica. No caso deste trabalho, que utiliza grandes distâncias na determinação da linha de base, é necessária a aplicação de modelos de correções para simular as variações climáticas entre as estações. Em dupla diferença de fase, as ambigüidades podem ser resolvidas com seu valor inteiro. Em geral, a técnica de dupla diferença é a técnica mais empregada em aplicações de alta precisão, podendo atingir a precisão milimétrica. Como ilustração da técnica dupla diferença, a Universidade da Califórnia possui, em seu sítio <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/SCOUT.cgi>, uma aplicação via internet chamada SCOUT (*Scripps Coordinate Update Tool*), que, através do envio pelo usuário de dados observáveis de uma estação em formato RINEX (descrito no ANEXO A), permite obter a solução de dupla diferença a partir da utilização de dados das estações IGS (item 5.1.1) encontrados no banco de dados do servidor SCOUT, sendo processados e, posteriormente, enviada a correspondente solução através de correio eletrônico.

### **5.2.2-Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)**

O método de posicionamento por ponto preciso (PPP) permite determinar a posição da estação utilizando órbitas e relógios precisos dos satélites, que são determinados, por sua vez, pelos centros de análise IGS.

Uma das grandes vantagens do modo PPP é a não necessidade de outras estações terrestres como referência, tornando as soluções independentes, o que pode ser considerada uma grande vantagem neste estudo sobre a determinação de variações locais das coordenadas da estação, pois evita propagação de erros e movimentos diferenciados entre estações como acontece no método de dupla diferença.

A qualidade dos resultados PPP está intimamente ligada à utilização de receptores de dupla frequência, qualidade das órbitas, relógios, modelos de refração troposférica, correção ionosférica e modelos físicos. Utilizam-se esses critérios e um tempo de observação razoável através das medidas de fase e estimação da ambigüidade em valores reais ou inteiros, pode-se atingir uma precisão centimétrica.

Alguns trabalhos na literatura já provaram a utilidade e a qualidade do método PPP, como é caso do trabalho de PEREZ *et al.* (2002), quando foi estimado o vetor de deslocamento horizontal da placa tectônica sul-americana (SOAM), e do estudo de MÔNICO (2000b), quando também houve divulgação de resultados de boa qualidade utilizando as estações da rede brasileira de monitoramento contínuo (RBMC).

Como ilustração da técnica PPP, o IBGE possui, atualmente, em uma página de internet, com acesso em <http://www.ibge.gov.br/home/.../ppp/default.shtm>, um aplicativo que permite o envio pelo usuário do arquivo de variáveis observáveis RINEX (descrito no ANEXO A), fornecendo, então, a coordenada da estação calculada no modo PPP e fazendo o envio de seu resultado via correio eletrônico.

### **5.2.3 Ajuste da Rede de Estações Permanentes**

A primeira etapa do processamento dos dados GPS realizado foi o ajuste das estações de referência da área de estudo, problema fundamental para compreensão da variação dos valores da coordenada vertical de cada estação e dos fenômenos que causam variação de suas coordenadas.

Apesar das estações utilizadas serem de referência para construção de seus respectivos sistemas geodésicos (SIRGAS e ITRF2005), resultando no fato de já



estarem previamente ajustadas, tanto as estações de referência da RBMC quanto as do IGS não possuem, em seus cálculos, a totalidade das variações verticais de suas coordenadas devidamente contabilizadas, sofrendo, assim, uma série de mudanças no decorrer do período de estudo. A principal causa da ausência do ajuste é a dificuldade pela não linearidade das variações verticais causadas pelos diversos fenômenos de difícil modelação que foram descritos no Capítulo 3.

Na região Amazônica, área de estudo desta dissertação, foram analisadas as estações permanentes existentes das redes IGS e RBMC, descritas anteriormente com objetivo de constituir uma rede local para o presente trabalho de modo a avaliar a intensidade e a área de abrangência das variações da coordenada vertical na região de estudo. Para o ajuste, visando ter uma boa abrangência geográfica na região Amazônica, foram selecionadas seis (6) estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (NAUS, SAGA, POVE, MABA, MAPA, BOAV), uma (1) estação IGS, chamada KOUR na Guiana Francesa, e uma (1) estação permanente instalada pela CPRM e pelo IRD, chamada URUK, descrita no Capítulo 6 - item 6.2.



**Figura 5.4- Rede local a ajustar com 6 estações da RBMC, 1 estação IGS na Guiana Francesa e 1 estação permanente instalada pela CPRM e o IRD.**

Para o ajuste de redes verticais GPS pelo método de dupla diferença, recomenda-se a utilização de redes globais com mais de 40 estações auxiliares e séries longas com mais de 10 anos de dados de forma a se conhecer bem a variação vertical, como exposto no trabalho de BERGEOT *et al.* (2009). No trabalho de BERGOT *et al.* (2009), ajustam-se os dados de uma solução de dupla diferença com estações com suas coordenadas livres, aplicando restrições mínimas e transformações de Helmert para transformar cada solução livre diária para a época do sistema de referência.

Inicialmente, foi realizada a tentativa de reproduzir uma solução global para os dados considerados neste trabalho por acreditar que esta seja uma solução mais estável. Contudo, após os primeiros cálculos, abandonou-se a idéia inicial devido:

- ao alto custo computacional necessário para o processamento de uma rede com mais de 40 estações;
- pelo fato de as séries disponíveis não serem tão longas quanto o necessário;
- pela dificuldade no processamento onde se necessita escolher estações auxiliares mais estáveis sem muitas variações em suas coordenadas;
- pela dificuldade de aplicação da transformação de Helmert em uma rede com grandes variações locais em suas coordenadas causadas por movimentos não lineares e não modeláveis;
- pela incerteza quanto à obtenção de bons resultados ou melhores que uma solução mais simples, considerando-se, no caso, apenas o uso de estações continentais.

Por esse conjunto de motivos, optou-se por uma solução mais clássica baseada em uma rede continental para o ajuste pelo método de dupla diferença, utilizando estações de referência fixas e relativamente distantes da área de influência de forma a minimizar a propagação de efeitos verticais das estações de referência. Para ajustar essa rede local, foram escolhidas cinco estações da rede de referência do ITRF2005 (SANT, ISPA, LPGS, CRO1, MANA), mostradas na Figura 5.5, julgando estas serem estações com boa estabilidade e qualidade.



**Figura 5.5- Rede de ajuste e estações de referência(em vermelho).**

Para o processamento das estações acima, também foi utilizado o método PPP (posicionamento de ponto preciso) descrito neste Capítulo no item 5.3.2. Assim, todas as estações são processadas por dois métodos, sendo o método PPP, conforme descrito anteriormente, capaz de prover soluções independentes para cada estação, fornecendo, assim, uma alternativa de processamento aos dados de dupla diferença, que poderia apresentar erros devido a problemas de qualidade de alguma estação fixa e/ou movimentos verticais não modelados em suas coordenadas. Ao final do estudo, a partir dos resultados obtidos, será escolhida a estratégia de processamento que melhor reflete a análise da variação da coordenada vertical de cada estação.

Para o período de ajuste pelos dois métodos descritos acima, foi selecionado o período de abril de 2008 até dezembro de 2009, a fim do período estar relacionado com o período de observações do satélite Jason-2, lançado em junho de 2008 e com a instalação da estação GPS permanente em Urucurituba (URUK), realizada em abril de 2008.

Os dados de todas as estações RBMC e IGS foram adquiridos por meio da internet através do protocolo de transferência de arquivos FTP (*file transference protocol*), via <ftp://geoftp.ibge.gov.br> do IBGE e via <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov>, para estações do IGS.

Para ambos os procedimentos do tipo FTP, foi utilizado um pequeno código (*script*), no qual, a partir de uma lista com o nome das estações e do período de dados necessários, automatiza-se o processo de aquisição de dados das estações permanentes. Os arquivos da estação de URUK foram adquiridos diretamente do receptor através das campanhas de campo realizadas durante o tempo de estudo deste trabalho.

Os arquivos das estações do IBGE vêm em formato RINEX (descrito no ANEXO A), comprimidos através do compactador ZIP. Os arquivos do IGS são disponibilizados em formato *compressed-rinex*, podendo ser convertidos para RINEX através do programa [crx2rnex.exe](#), contido no pacote de aplicações do GINS, que será descrito a seguir. Os arquivos de Urucurituba foram obtidos em formato proprietário da TRIMBLE e foram convertidos para RINEX, usando inicialmente o conversor do fabricante, Todavia esse conversor, posteriormente, apresentou falhas na conversão devido a saltos no tempo registrado no relógio do receptor. O problema foi resolvido convertendo-se os arquivos novamente e usando o aplicativo TEQC da UNAVCO (*University NAVSTAR Consortium*), que pode ser adquirido via o sítio de internet <http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>.

Os arquivos, após serem convertidos, foram organizados automaticamente via códigos específicos desenvolvidos (*script*) em pastas separadas pelo ano e, posteriormente, pelo dia do ano, de forma a facilitar o processamento das etapas seguintes.

#### **5.2.4 Código Computacional GINS para Processamento de Dados GPS**

Esta seção visa descrever um pouco da história e das funcionalidades do código computacional utilizado para tratamento dos dados GPS.

O GINS (Géodésie par Integrations Numériques Simultanées) foi originalmente concebido nos anos 70 do século XX pelo grupo do CNES/GRGS (*Centre National d'Études Spatiales / Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale*) para tratar dados disponíveis de geodésia espacial. Nessa época, o código computacional podia somente tratar dados de um satélite a cada vez, e seus principais usos eram (LOYER, 2007):

- utilização da geodésia espacial para a obtenção da órbita precisa dos satélites;
- tratamento e interpretação de satélites para observação campo gravitacional da Terra;

- posicionamento preciso de estações das redes de sistemas de monitoramento por satélite com objetivo de criar sistemas de referência.

A inicialização do GPS no GINS veio nos anos 90 do século passado, com o satélite Topex, o qual possuía embarcado um receptor experimental GPS, que era capaz de observar seis (6) satélites simultaneamente para, assim, medir, de forma mais precisa, a sua órbita. Nessa época, o GINS foi modificado para incluir, em seu processamento, os dados dos receptores GPS a bordo de satélites e os dados de receptores terrestres. Desse modo, o GINS passou a ser utilizado para tratamento dos mais variados tipos de medição como, por exemplo:

- medições laser (SLR e LLR);
- medições de interferometria em bases longas (VLBI);
- medições de satélites altímetros;
- medições do sistema GPS (modos não diferencial e de dupla diferença) do Grace (velocidade distancia e aceleração);
- medidas planetárias, como, por exemplo, o efeito de Marte e a rede do DSN (*Deep Space Network*).

Abaixo, segue a Tabela 5.1 de dados tratados pelo GINS e sua precisão estimada.

**Tabela 5.1- Dados tratados pelo GINS e sua precisão estimada (Fonte BIANCALE *et al.*, 2008).**

Óticos	1962-1971( $\sigma \sim 2''$ )
TRANET	1984-1987( $\sigma \sim 2\text{mm/s}$ )
Laser*	1967-( $\sigma \sim 15\text{m}-2\text{mm}$ )
Altimetria*/Xover*	1975-( $\sigma \sim 20-1\text{cm}$ )
DORIS*	1990-( $\sigma \sim 0,3-0,1\text{mm/s}$ )
PRARE	1994-2001( $\sigma \sim 1\text{cm}-0,1\text{mm/s}$ )
GPS*	1992-( $\sigma \sim 1\text{cm}-5\text{mm}$ )
VLBI*	2000-( $\sigma \sim 1\text{cm}-5\text{mm}$ )
GRACEKBR*	2002-( $\sigma \sim 1\mu\text{m}-0,1\mu\text{m/s}$ )
DSN*	1970-( $\sigma \sim .1-.01\text{mm/s}$ )
GOCE*	2008-( $\sigma \sim 3\text{mE}$ )

As mudanças mais recentes têm procurado fazer o GINS ser operacional para tratamento massivo de dados, como os do satélite CHAMP (lançado em 2000), também

dos satélites GRACE (lançados em 2002), que embarcaram os receptores GPS como principal ferramenta de acompanhamento de suas órbitas. Desde o início de 2004, o código computacional é usado para tratar a rotina de dados de rede de cerca de 100 estações GPS para o cálculo das órbitas precisas dos satélites GPS. Em 2008, o CNES associou-se ao CLS (*Collecte Localisation Satellites*) e foi declarado como centro de análise do IGS (descrito no item 5.1.1), onde o GINS é utilizado para cálculos das estações GPS.

O código computacional é também utilizado em simulações, em testes de novos modelos e na preparação de futuras missões de aquisição de dados. É ainda empregado para a geração de produtos sistemáticos, como modelos de gravidade planetária ou terrestre, a exemplo do modelo GRIM e mais recentemente do modelo EIGEN, e para a determinação de parâmetros de rotação da Terra bem como ferramenta de análise dos Centros de Serviço Internacional Dóris.

O GINS contribui com a experiência do CRC (*IERS Combination Research Centers*), demonstrando sua potencialidade no tratamento de várias técnicas, combinando cinco (5) técnicas de geodésia espacial em uma computação homogênea e simultânea. Segue um exemplo do uso e da potencialidade do GINS no tratamento de várias técnicas descritas por PERSOSANZ *et al.* (2008) na Figura 5.6.

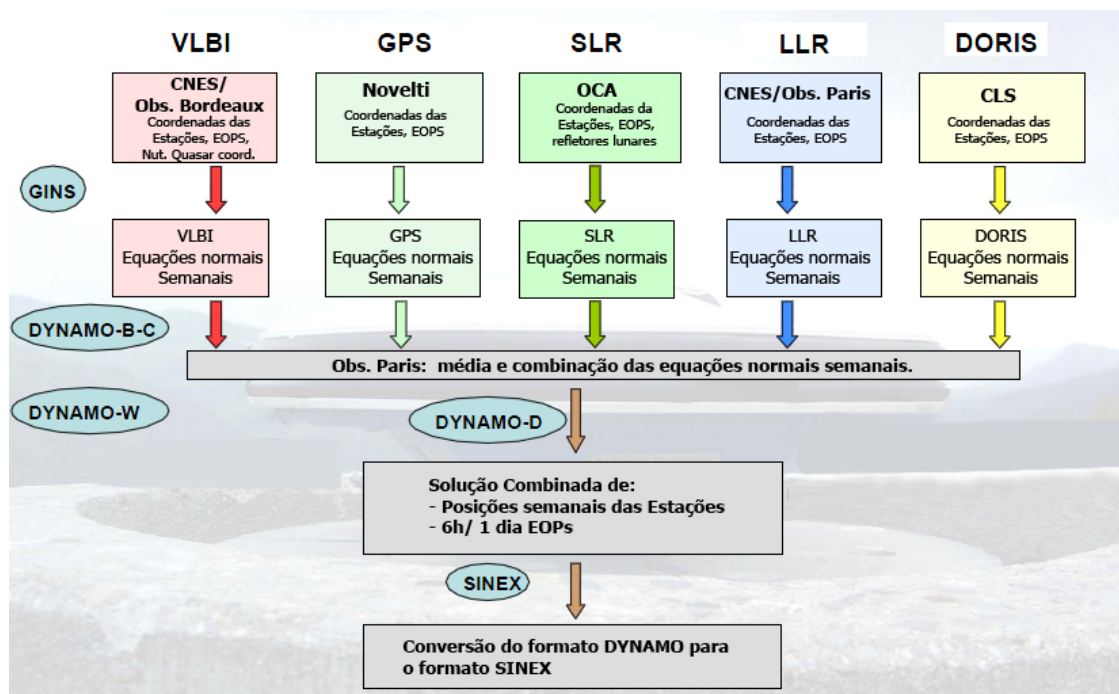


Figura 5.6- Contribuição do GINS para o CRC (Fonte: PEROSANZ *et al.*, 2008, adaptado pelo autor para português).

Durante os últimos 15 anos, o código computacional tem acompanhado a evolução de várias normas internacionais e algoritmos, e vem continuando a evoluir de forma a melhorar a modelagem de dados.

#### **5.2.4.1 Princípios do GINS**

O GINS é um código computacional de tratamento de dados de geodésia espacial, terrestre e planetária. O princípio geral do código computacional GINS é (LOYER, 2007):

- calcular o melhor resíduo ponderado entre as medidas e modelos utilizados;
- construção de equações lineares ligando os resíduos com correções sobre os parâmetros dos modelos.

Para alcançar o primeiro princípio, o código computacional contém os mais precisos modelos com equações de medida:

- modelos de deslocamento das estações de referência;
- modelos de força (Terra, entre outros planetas);
- modelos de propagação das medições na atmosfera;
- modelos para calcular, com precisão, a trajetória dos satélites artificiais; as efemérides dos satélites artificiais são integradas numericamente dentro do código computacional;
- modelos de ponderação de medidas.

Para atingir o segundo princípio, o código computacional contém algoritmos de cálculo das derivadas parciais de muitos parâmetros geofísicos dos modelos de força (por exemplo, os coeficientes do campo gravitacional) e dos modelos geométricos utilizados no cálculo dos resíduos ponderados das medidas (parâmetros de rotação da Terra, deslocamento de estações, entre outras). Contém ainda elementos de álgebra linear para formar equações lineares (equações normais) a partir das derivadas parciais, resíduos ponderados das medidas e de elementos para resolver essas equações. Além de

um conjunto de elementos para a definição, criação, indexação e, em suma, gestão no sentido mais amplo dos parâmetros tratados pelo código computacional.

O GINS também permite fazer iterações para ajustar uma parte de modelos *a priori* com as observações (elementos orbitais, desvio das medidas, entre outras), eliminando certas medidas antes da formação de equações lineares finais. As equações lineares de GINS são formadas para a convergência, para serem cumulativas, restritas, reduzíveis e, finalmente, inversíveis pela cadeia de manipulação de equações normais chamada DYNAMO.

Entre outras aplicações, também é possível utilizar as efemérides dos satélites como pseudo-medidas de forma a simular medidas. Pode-se, também, utilizar diferentes tipos de dados para serem tratados simultaneamente utilizando alguns dos parâmetros comuns entre eles. Nos dias atuais, o código computacional está mais integrado de forma a garantir que todos os seus tipos de medida recebam o mesmo tratamento como correções de deslocamento de estações terrestres, modelos de força, rotação, propagação atmosférica e construção e inversão de equações normais.

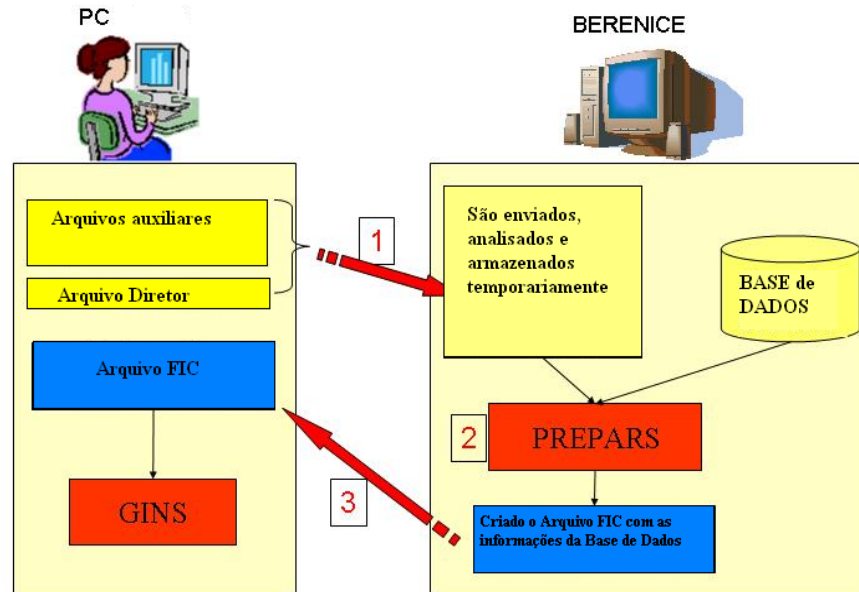
#### **5.2.4.2 Treinamento e Instalação do Código Computacional GINS**

A licença do código computacional GINS foi adquirida para execução deste trabalho através do contato com o grupo do GRGS/CNES em Toulouse, onde também foi realizado o treinamento na utilização e instalação do código. Para instalar o GINS, necessita-se de uma plataforma Linux que contenha, em seus aplicativos instalados, o *Perl v5.8* ou superior, o módulo *Tk* responsável pela interface gráfica e um acesso *SSH* para permitir a conexão segura com o servidor do GINS no CNES. Também é necessário um protocolo de comunicação fixo *IP* para liberar a conexão com o servidor e assinar o termo de licença que prevê o uso do código computacional para fins não-comerciais e a citação de seu uso em trabalhos científicos. Cumprida essa parte, é recebido o pacote de aplicativos iniciais e, através da conexão com o servidor do GINS, mediante a senha do usuário e *IP* registrados, é feita a instalação completa.

Durante o processamento de dados de geodésia espacial, são enviados, para o servidor do CNES, chamado de BERENICE, uma série de arquivos contidos no computador do usuário, como, por exemplo, as observáveis GPS, arquivos de estação e de configuração do processamento. Após receber esses arquivos, o servidor analisa o período dos dados enviados e confere as solicitações definidas pelo usuário na base de



dados do servidor, que contém arquivos como efemérides precisas, relógios precisos, modelos físicos. Esses arquivos juntam-se aos arquivos enviados pelo usuário e formam um arquivo único chamado de FIC; então, esse arquivo FIC é devolvido para o usuário e, localmente no computador do usuário, é executado o processamento dos dados GPS.



**Figura 5.7- Esquema de envio de dados pelo usuário e pelo servidor do GINS (Fonte: BIANCALE *et al.*, 2008, adaptado pelo autor para português).**

No Brasil, o GINS foi instalado em um computador PC na CPRM utilizando o IP fixo da companhia. Durante a execução do trabalho, foram realizadas mais duas visitas a Toulouse para acompanhamento do trabalho e definição de estratégias de processamento, totalizando dois (2) meses de treinamento para desenvolver a aptidão necessária para execução do trabalho.

### 5.3 Processamento das Estações Permanentes no GINS

#### Pré processamento dos dados:

- modos não diferencial e simples diferença;
- detecção de perda de ciclos (*cycle slips*);
- remoção de dados espúrios (*outliers*);
- eliminação da passagens curtas.

#### Observáveis Básicas:

- combinação linear das medidas de fase (para eliminação de efeitos da ionosfera) nos modos não diferencial e dupla diferença;
- corte de satélites com elevação inferior a 10 graus; utilização de dados com frequência de 30 segundos; peso de 3,5 mm para medidas de fase não diferenciais de ionosfera livre no zênite e colocação de peso em dependência da elevação seguindo a função  $1/\cos(z)**2$ .

#### Modelos Geométricos

- para antena do receptor; foram usadas as correções do centro de fase, dependentes da elevação do satélite observado de acordo com o arquivo IGS05.atx;
- para o centro de massa do satélite e calibração do centro de fase de sua antena de acordo com o IGS05.atx.

#### Correções Atmosféricas

- para a troposfera, foram utilizados dados meteorológicos do modelo ECMWF (mapas de 6 horas e 2.5 x 2.5 graus);
- para a ionosfera; eliminaram-se os efeitos de primeira ordem por combinação linear das frequências L1 e L2.

#### Movimentos da crosta terrestre

- velocidades das estações fixas aos valores do modelo ITRF2005;
- modelo completo de marés terrestres de acordo com as convenções do IERS (2003); maré polar aplicada de acordo com IERS (2003) e pólo médio de  $m1=0,065$ ;  $m2=0,330$  arcsec;
- carga oceânica, com amplitudes e fase dadas pelo FES2004 (LYNARD *et al.*, 2006).

Para o modo PPP, obtiveram-se soluções diárias; já para o modo de dupla diferença, foram obtidas soluções de 12 horas de modo a evitar problemas de memória durante o processamento; no modo dupla diferença, as estações de referência do IGS tiveram suas coordenadas fixadas, e, posteriormente, as equações normais foram combinadas de forma a gerar uma solução para cada semana GPS.

Para a completa descrição dos procedimentos de dupla diferença e PPP, podem ser consultados o ANEXO B e ANEXO C ao fim do documento deste trabalho.

#### **5.4 Nivelamento das réguas linimétricas**

Os nivelamentos das réguas linimétricas da área de estudo foram executados pelo método de dupla diferença, sendo escolhida a estação de referência mais próxima de cada régua, considerando, assim, que esta estava sujeita aos mesmos efeitos de variação vertical detectados na estação de referência. Todas as réguas foram ocupadas pelo menos três (3) vezes durante as nove (9) campanhas realizadas, garantindo assim uma boa quantidade de dados amostrados para cada régua e permitindo detectar os possíveis deslocamentos causados pela instabilidade dos locais de monitoramento. O processamento foi feito com o uso do software GINS com uma configuração similar a de dupla diferença das estações permanentes descrito acima (item 6.3) somente como diferencial de usar apenas uma (1) estação GPS permanente, a mais próxima, no processamento e com suas coordenadas fixas.

#### **5.5 Processamento Cinemático do Perfil dos Rios**

Para o processamento cinemático dos dados coletados durante a campanha, diferentemente dos outros dados GPS coletados, não foi utilizado o código computacional GINS, fato devido a dificuldades operacionais de se realizar processamentos cinemáticos no GINS. O GINS está sofrendo uma série de melhorias no processamento cinemático, que necessitaria de um conhecimento mais profundo de seus mecanismos e de maior tempo para testes e análises de resultados. Inicialmente, foi tentado o método de posicionamento por ponto preciso para dados cinemáticos, mas, como descrito anteriormente, o método de PPP necessita de utilização de arquivos de relógios precisos do IGS, sendo estes fornecidos apenas a uma taxa de 30 segundos não compatíveis com uma boa solução cinemática; existem os relógios de 5 segundos

fornecidos pelo Centro de Determinação de Orbitas da Europa (CODE), que permitiram uma melhor solução para os resultados PPP (BOCK *et al.* , 2009), contudo eles não estavam disponíveis para a maior parte do período dos dados adquiridos.

Por esse motivo, buscou-se uma solução comercial já consolidada com uma precisão certamente não tão boa quanto ao GINS, mas mais operacional momentaneamente. Sendo assim, foi escolhida a solução da Trimble no seu código computacional Trimble Total Control (TTC). O TTC atende a uma série de requisitos fundamentais para levantamentos GPS de alta precisão, permitindo, por exemplo, o uso de órbitas precisas, utilizando o arquivo de correções de antenas segundo as recomendações IGS, possuindo modelo de troposfera Saastamoinen e edição de parâmetros atmosféricos, além de permitir a resolução de dados cinemáticos em dupla diferença na frequência de um (1) segundo, fator importante para os levantamentos executados sobre os rios com incidência de ondas.

A estratégia adotada no processamento para cada dado cinemático obtido foi:

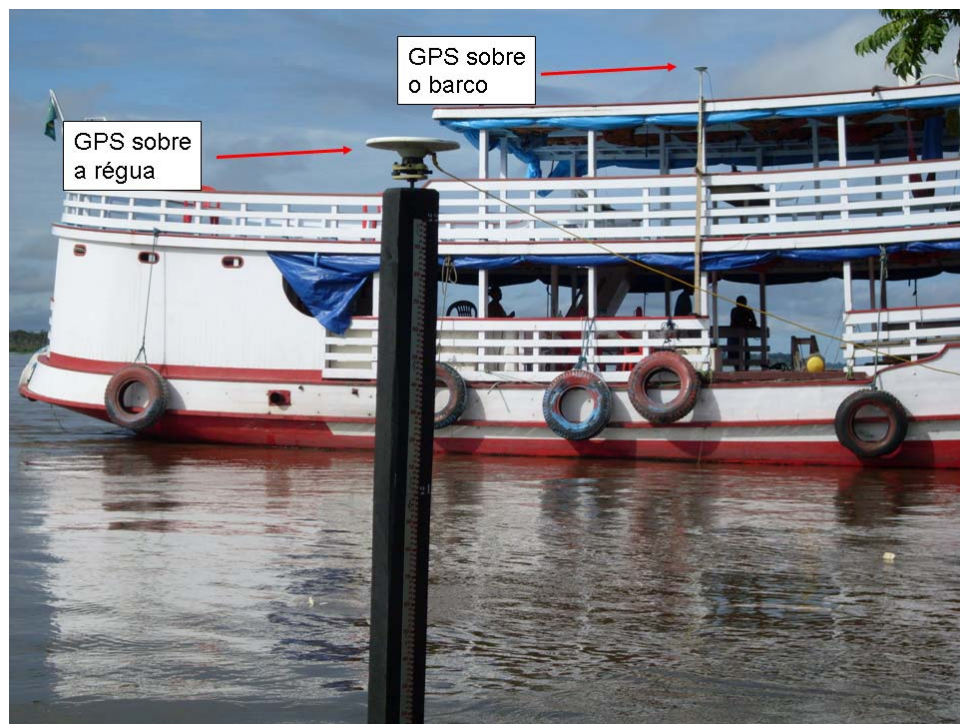
- a utilização da estação de referência mais próxima, destacando-se o uso de linhas de base muito curtas (<10 km), ótimas para o método de dupla diferença, sendo geralmente a base um GPS sobre a régua linimétrica na margem do rio;
- utilização, como fixo, do valor da coordenada base da régua linimétrica obtida no processamento de dupla diferença obtido pelo GINS;
- utilização de órbitas precisas disponibilizadas pelo IGS;
- combinação linear das frequências L1 e L2 para atenuação de efeitos da ionosfera para linhas de base maiores que 5 km; para linhas de base menores, a solução foi baseada apenas na frequência L1.
- uso de modelo de correção troposférica Saastamoinen;
- solução dos dados para cada segundo;
- ângulo de corte das observações de satélites abaixo de 10 graus.

As soluções obtidas no Trimble Total Control são posições tridimensionais do ponto de referência da antena (ARP). Devido à finalidade do estudo ser a obtenção de perfis alimétricos da linha de água, faz-se necessária a redução da altura do ponto ARP para a água. Para o flutuante GPS, a medição é feita diretamente com uma trena,

contudo, para o barco que possui alturas de antena maiores que cinco (5) metros, algumas soluções tiveram que ser aplicadas para obter resultados mais coerentes devido ao movimento constante do barco.

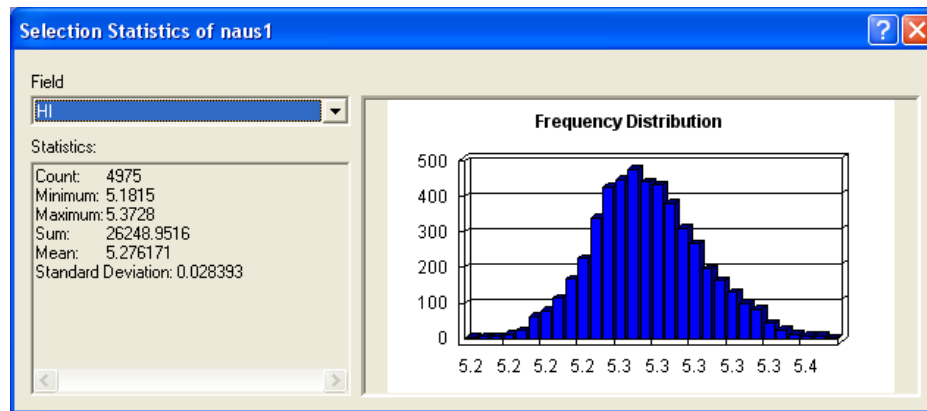
Duas soluções foram aplicadas no nivelamento das antenas sobre os barcos. Uma é a utilização da própria dupla diferença que fornece a diferença de altura entre a antena sobre a régua linimétrica e a antena do barco. Na antena GPS sobre a régua, conhece-se a exata distância entre a antena e a água, podendo-se aplicar as diferenças para obter a altura da antena do barco em relação à régua, sendo escolhido o período quando a régua e o barco estão próximos o suficiente para não haver declividade da linha de água entre ambos (Figuras 5.8 e 5.9).

Essa solução é feita exportando os resultados do processamento no TTC para um código de geoprocessamento, para poder se visualizar melhor a distribuição espacial dos dados cinemáticos e fazer correções necessárias para obtenção dos perfis da linha de água, sendo demonstrados os processos nas Figuras 5.8 e 5.9.



**Figura 5.8- Exemplo das estações utilizadas em dupla diferença para se obter o nivelamento da altura de antena do barco para a água.**

Pelo método de dupla diferença, de base muito curta, segue, como exemplo, a Figura 5.9.

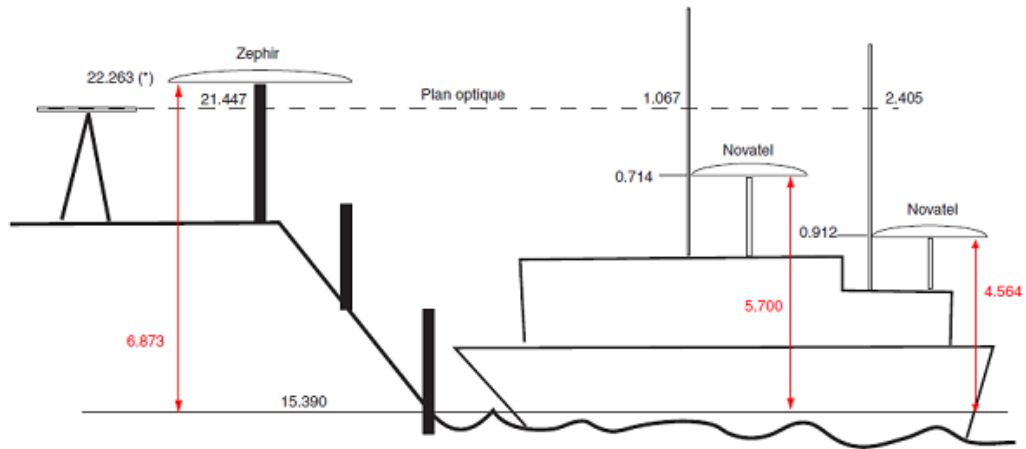


**Figura 5.9- Seleção de dados GPS para o nivelamento de antena do barco.**

Pela Figura 5.9, pode-se observar, na palavra *count*, de valor 4975, que representa 4975 segundos de dados, ou seja, 1 hora e 23 minutos de dados GPS, tempo que o barco ficou parado em frente à estação. No exemplo acima, foi pego o valor médio (*mean*) de número 5.276, que representa, em metros, a altura da antena, que é, posteriormente, comparada com a altura elipsoidal do nível de água dado pela régua linimétrica nivelada.

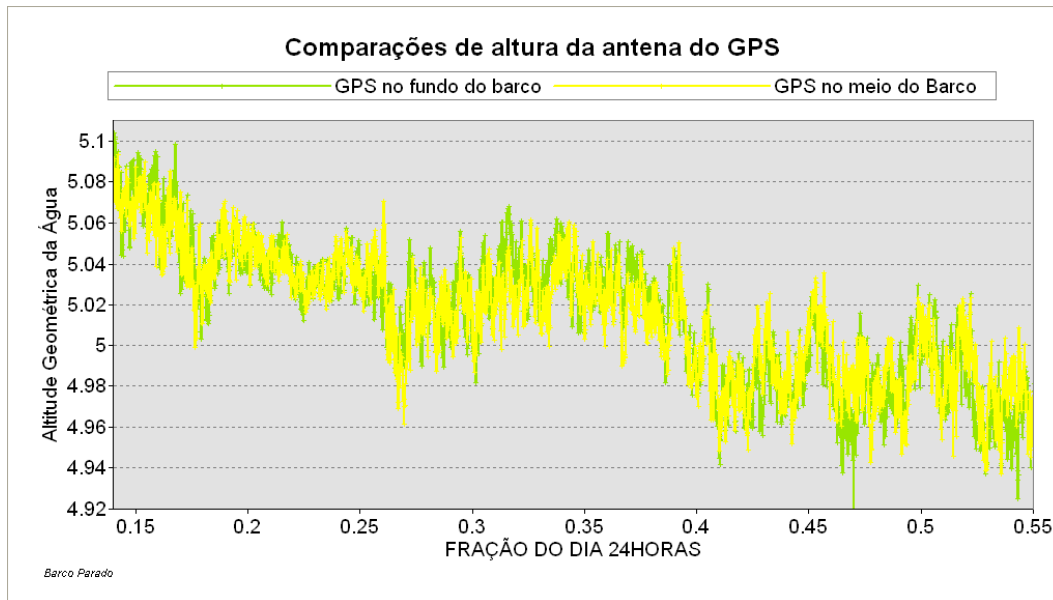
A outra solução apresentada para o nivelamento, como forma de comparação dos resultados de dupla diferença, é a utilização de mais de uma técnica como, por exemplo, o do nivelamento geométrico com o nível estacionário perto da régua linimétrica.

### Nivelamento das alturas de antena a partir de nível topográfico



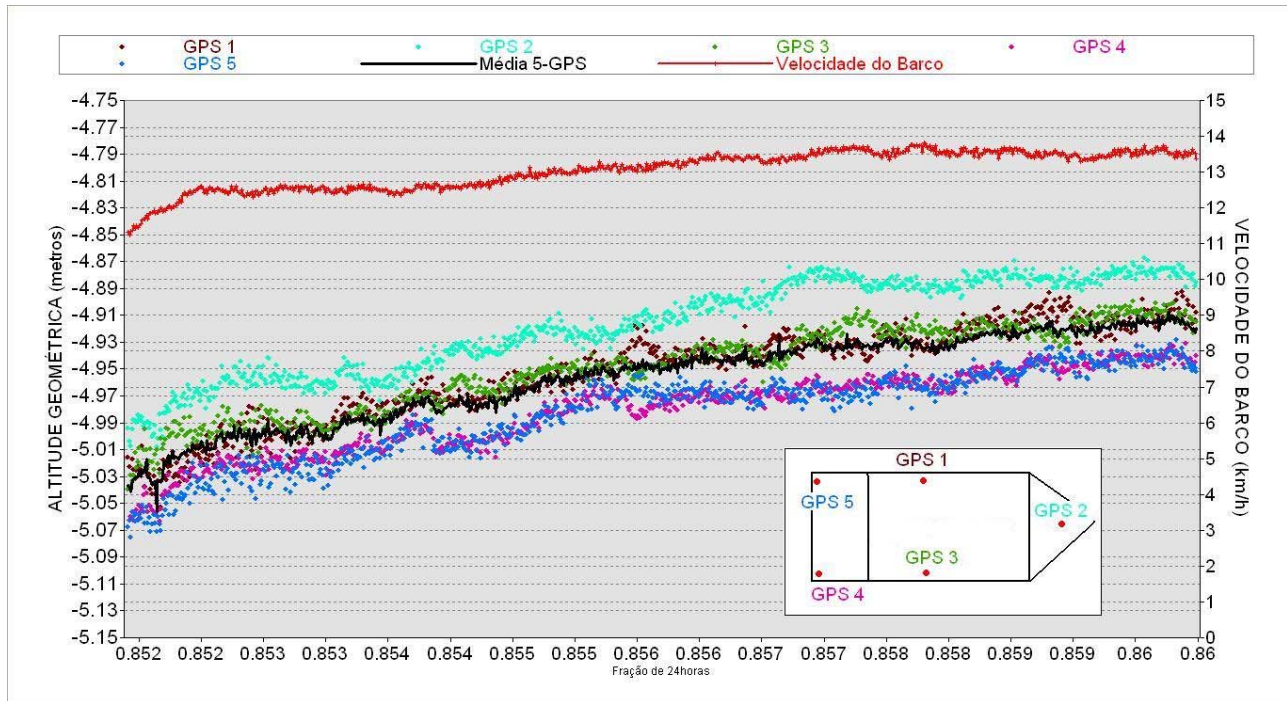
**Figura 5.10- Exemplo de nivelamento geométrico das alturas da antena do barco (Fonte: CALMANT, 2009).**

No caso das campanhas que utilizaram mais de um receptor sobre o barco, após o nivelamento, também era checada a consistência dos dados da altura das antenas em relação à água durante os períodos onde o barco permanecia parado. Abaixo, segue o exemplo das alturas da linha de água medidas com o barco parado durante mais de 10 horas à noite; o bom ajuste entre as medições de cada antena indica uma boa solução do nivelamento.



**Figura 5.11 – Variação do nível de água medida por dois receptores GPS.**

A Figura 5.12 resalta a importância de vários fatores importantes durante a aquisição de dados cinemáticos, como a velocidade e posição e distribuição dos GPS sobre o barco.



**Figura 5.12- Barco movimentando em velocidade; o barco levanta a frente e baixa o fundo;; o gráfico mostra a antena GPS do fundo mais baixo que a antena mais a frente.**

Pela Figura 5.12, observa-se que as antenas GPS distantes do centro do barco (GPS5, GPS4 e GPS2) sofrem mais com os efeitos da velocidade de 14 km/h, enquanto as antenas dos receptores GPS3 e GPS1, instaladas no meio do barco, têm seus valores próximos a média dos valores de todos os receptores GPS. Ressalta-se, então, que a instalação de vários receptores com antenas bem distribuídas, quando possível, e quando não possível, com a colocação das antenas dos receptores em locais mais adequados como o centro do barco, ajudam sensivelmente a redução dos efeitos de velocidade. A manutenção de uma velocidade constante e de valor baixo entre 4 e 7 km/h também é recomendada durante a aquisição de dados cinemáticos.

Outras correções podem e foram aplicadas quando necessárias aos levantamentos por receptores GPS feitos pelo barco; uma delas é a variação de altura do barco em relação à água. Durante o percurso da campanha, são gastos, em média, 1500 litros de



combustível em uma duração de sete(7) dias; essa perda de massa, devido à perda de combustível, provoca a subida do barco em relação à água e, em consequência, o aumento das alturas de antena. Nesse sentido, geralmente é realizado mais de um levantamento de altura de antena durante a duração da campanha, de forma a corrigir linearmente esse tipo de problema.

É importante se observar a variação do rio ao longo do tempo, fator que influi quando se deseja obter a declividade da linha de água entre trechos observados. Em tomadas longas de perfil por receptores GPS, com duração de várias horas, há necessidade da correção da taxa de subida e de descida do rio ao longo do tempo; esse procedimento pode ser feito utilizando leituras obtidas através das réguas linimétricas, antes e depois de realizados levantamentos GPS.

Cabe-se destacar que a qualidade dos dados de declividade processados cinemáticos é de difícil interpretação, pois são medidas do movimento do barco em relação à água. Nesse contexto, consideram-se todos os movimentos causados, como a real variação da declividade da linha de água, ondas, ventos, movimentos causados pela mudança de direção e velocidade do barco e velocidade do rio.

Para que o resultado do perfil da linha de água seja o mais coerente possível, são, inicialmente, eliminados após o processamento os dados com erros espúrios e dados com erros médios quadrático altos (RMS). Conforme anteriormente falado, a repetitividade dos dados com vários receptores GPS sobre o barco, a correta instalação da posição das antenas e a execução de várias passagens sobre a mesma linha proporciona que os dados obtidos por receptores GPS sejam descritos com a declividade mais adequada.

## **5.6 Informações Auxiliares**

Como forma de validação dos resultados obtidos após o tratamento dos dados das estações permanentes GPS, foram consideradas as soluções da missão gravimétrica GRACE, descrita no Capítulo 3 - item 3.4.5. As séries do GRACE podem ajudar a compreender certos sinais ao longo do tempo encontrados nos resultados de dados GPS e a variabilidade espacial de efeitos de carga.

As séries utilizadas, neste trabalho, correspondem às obtidas a partir das soluções do CNES/GRGS (*Centre National d'Études Spatiales/ Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale*). Essas séries foram calculadas e cedidas gentilmente pelo

pesquisador G. Ramillien do GRGS. As séries podem também ser adquiridas via o sítio de internet do GRGS <http://bgi.cnes.fr:8110/geoid-variations/README.html> .

Nessas séries, foi aplicada a equação de deslocamento radial de forma que os dados gravimétricos fossem convertidos em variações equivalentes de altura de água nos continentes. As soluções GRACE, definidas no GRGS, não contêm os efeitos de carga atmosférica, pois estes foram removidos a partir do uso de resultados de pressão atmosférica calculados pelo modelo ECMWF, o que torna sua comparação com os resultados GPS mais restritas.

Para a comparação dos dados cinemáticos, considerou-se o modelo de geóide EGM08 (descrito no Capítulo 2 - item 2.2.4). Aproveitam-se as características da dinâmica das águas, que têm seus movimentos de transferência de massa descritos na maior parte em relação ao potencial da gravidade. Nesse sentido, considerou que a aplicação do modelo de geóide para transformação das altitudes geométricas (elipsoidais), obtidas no levantamento GPS cinemático, em as altitudes físicas (ortométricas) possibilitaria a descrição adequada dos processos hidrônicos. A coerência da correção do geóide em relação à hidrodinâmica, de certa forma, pode validar tanto o modelo de geóide quanto os dados obtidos no processamento cinemático, ajudando, assim, a definir o modelo de geóide adequado para a área de estudo.

As medições de correntômetros acústicos de efeito Doppler (ADCP), descritas no Capítulo 6 - item 6.5, também foram usadas em uma tentativa de explicar os processos hidrodinâmicos que influenciam na variação dos perfis de altura de linha de água.

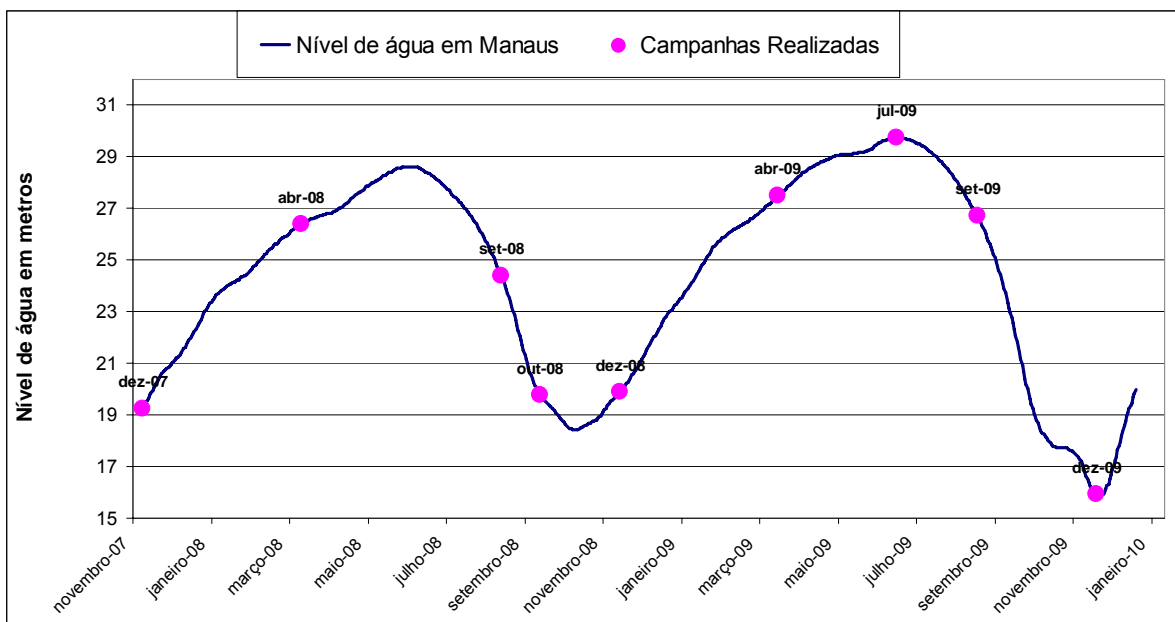
## CAPÍTULO 6- COLETA DE DADOS EM CAMPO

No âmbito desta dissertação, com o apoio da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM – Ministério da Minas e Energia do Brasil), responsável, junto a Agência Nacional de Águas (ANA), pela operação de parte significativa da rede pluviométrica e fluviométrica brasileira, e do *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD - França), foram realizadas nove (9) campanhas de campo entre os anos de 2007 e 2009 na região de estudo do projeto Dinâmica Fluvial, com a participação do autor. Essas campanhas foram concebidas para a instalação e manutenção das estações *in situ*, coleta de dados fluviométricos e medições por receptores GPS para nivelamento das réguas e obtenção de perfis altimétricos dos rios, com informações, em grande parte, apresentadas neste trabalho. As nove (9) campanhas realizadas estão brevemente descritas a seguir:

1. campanha 0712 em dezembro de 2007, realizada apenas por técnicos de hidrometria da CPRM para instalação das estações fluviométricas nos locais pré-selecionados (Figura 5.1) em escritório através dos pontos de passagem dos satélites altímetros;
2. campanha 0804 em abril de 2008, primeira campanha realizada pelos pesquisadores do projeto, quando foram executados os primeiros nivelamentos de régua por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP;. instalação da estação permanente GPS URUK em Urucurituba;
3. campanha 0809 em setembro de 2008, realizada na área da Figura 6.1, sendo efetuadas coletas de dados nas estações fluviométricas e GPS em URUK; nivelamentos das réguas por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP;
4. campanha 0810 em outubro de 2008 de 2009, executada no reservatório de Balbina (Figuras 1.1 e 7.40), sendo realizado o perfil da linha de água do reservatório, nivelamento da régua do reservatório e coleta da série de níveis do lago;
5. campanha 0812 em dezembro de 2009, realizada na área da Figura 6.1, sendo executadas coletas de dados nas estações fluviométricas e GPS

- em URUK; nivelamentos das réguas por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP;
6. campanha 0904 em abril de 2009, realizada na área da Figura 6.1, sendo desenvolvidas coletas de dados nas estações fluviométricas e GPS em URUK; nivelamentos das réguas por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP;
  7. campanha 0907 em julho de 2009, realizada na área da Figura 6.1, com coleta de dados nas estações fluviométricas e GPS em URUK; nivelamentos das réguas por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP;
  8. campanha 0909 em setembro de 2009, realizada na área da Figura 6.1, quando foi feita coleta de dados nas estações fluviométricas e GPS em URUK; nivelamentos das réguas por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP;
  9. campanha 0912 em dezembro de 2009, realizada na área da Figura 6.1, incluindo coleta de dados nas estações fluviométricas e GPS em URUK; nivelamentos das réguas por receptores GPS e medições com o barco de GPS e ADCP.

Com vistas a melhor ilustrar temporalmente a realização das campanhas simultaneamente com a sazonalidade do ciclo hidrológica na região de estudo, apresenta-se, na Figura 6.1, a ordem cronológica do trabalho de campo.



**Figura 6.1 – Identificação cronológica das nove campanhas de campo no ciclo hidrológico.**

Nota-se que as campanhas foram realizadas em diferentes partes do ciclo hidrológico, abrangendo os períodos de cheia, de estiagem e de transições entre os dois regimes. Adicionalmente, para realizar as medições GPS das campanhas descritas acima, foram utilizados, no nivelamento de réguas fluviométricas e coleta dos perfis da linha de água, os receptores GPS TRIMBLE 5700 (Tabela 6.1 – item 1) com antenas *Zephyr* (Tabela 6.1 – item 2), receptores GPS NOVATEL DL4-PLUS (Tabela 6.1 – item 3) com antenas 702 GG (Tabela 6.1 – item 4) e receptores GNSS TECGEO GTR-2 (Tabela 6.1 – item 5) com antenas 702 GG. Na estação permanente GPS, em URUK, foi alocado um receptor TRIMBLE 5700 (Tabela 6.1 – item 1) com antena *Choke Ring* (Tabela 6.1 – item 2).

Outras campanhas emergenciais não programadas foram realizadas, sendo executadas somente por técnicos de hidrometria da CPRM para manutenção das estações fluviométricas, incluindo ainda o apoio de algumas pessoas para observação e obtenção de informações hidrológicas. Nos itens seguintes, serão descritas as atividades normalmente executadas durante cada campanha.

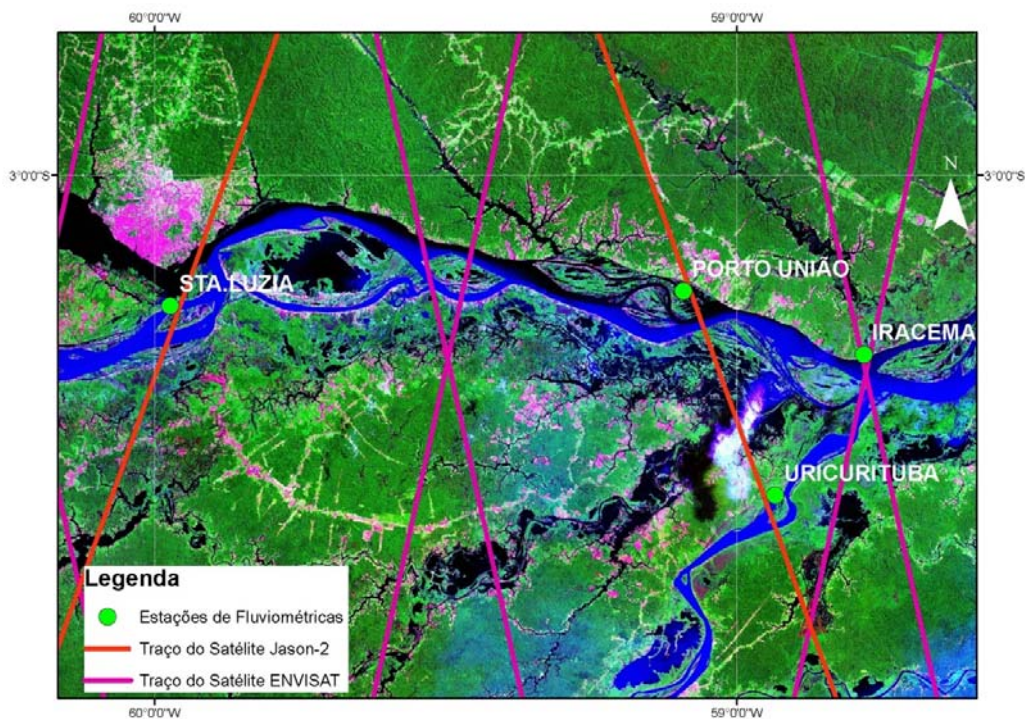
**Tabela 6.1 – Endereços eletrônicos correspondentes aos equipamentos empregados nas campanhas de campo.**

- |     |   |
|-----|---|
| (1) | <a href="http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-237933/022543-074E-P_5700_DS_0808_LR.pdf">http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-237933/022543-074E-P_5700_DS_0808_LR.pdf</a> |
| (2) | <a href="http://www.trimble.com/infrastructure/pdf/gnss-choke-ring-antenna_brochure.pdf">http://www.trimble.com/infrastructure/pdf/gnss-choke-ring-antenna_brochure.pdf</a>                             |
| (3) | <a href="http://www.navtechgps.com/Downloads/DL4plus.pdf">http://www.navtechgps.com/Downloads/DL4plus.pdf</a>   |
| (4) | <a href="http://www.novatel.com/Documents/Papers/GPS701_702GG.pdf">http://www.novatel.com/Documents/Papers/GPS701_702GG.pdf</a>   |
| (5) | <a href="http://www.techgeo.net/downloads/Folder_GTR-G2.pdf">http://www.techgeo.net/downloads/Folder_GTR-G2.pdf</a>   |

## **6.1 Rede de Estações para Monitoramento da Altimetria por Satélites**

Para auxiliar na avaliação da tecnologia de altimetria espacial, em função da área de estudo, foram instaladas, pela CPRM, estações fluviométricas próximas, tanto quanto possível, aos locais de passagem dos satélites. Assim, foram instaladas as estações de Santa Luzia no rio Solimões, perto do traço do Jason-2, Porto União e Iracema no rio Amazonas, perto dos traços Jason-2 e Envisat, respectivamente, e Urucurituba no rio Madeira, perto do traço do satélite Jason-2 (Figura 6.2).

A primeira campanha de campo foi realizada em dezembro de 2007, na estação da seca na região Amazônica com o propósito de instalar as primeiras estações fluviométricas do projeto, que correspondem à estação de Santa Luzia no rio Solimões, ainda em operação, e à estação de Nossa Senhora do Rosário no rio Madeira, que foi posteriormente desativada para a instalação da estação de Urucurituba; a Figura 6.2 demonstra a configuração atual de estações do projeto.



**Figura 6.2- Locais da rede de estações fluviométricas instaladas para avaliação de tecnologia de altimetria espacial.**

Essa foi, possivelmente, a primeira rede de estações fluviométricas instalada no mundo com o objetivo principal de avaliação de tecnologia de altimetria por satélites em grandes rios, o que confere um grau de ineditismo ao trabalho aqui exposto. O projeto ainda contou com a utilização de duas outras estações já existentes e suficientemente próximas aos traços de satélites. São elas as estações do Porto de Manaus da ANA (Agência Nacional de Águas) e da represa de Balbina, operada pela Eletronorte.

Os dados das estações fluviométricas, conforme mostra a Figura 6.3, permitem a comparação com os dados obtidos pela tecnologia de altimetria espacial. Sob esse prisma, a qualidade dos dados gerados é essencial, sendo necessárias diversas campanhas de manutenção para coleta e verificação da estabilidade dos locais de instalação. Neste contexto várias campanhas de manutenção foram realizadas sob responsabilidade da CPRM para coleta e verificação e manutenção da estabilidade dos locais de instalação



**Figura 6.3- Exemplo de estação fluviométrica e seus lances de régua.**

## **6.2 Instalação e Manutenção da Estação Permanente GPS**

Consoante descrito no Capítulo 3, foi possível mostrar que a superfície terrestre está sujeita a uma série de movimentos, tendo sua maior magnitude na variação vertical com efeitos na ordem de 10 centímetros. Na área de influência do presente estudo desta dissertação, encontra-se apenas a estação NAUS GPS da rede brasileira de monitoramento contínuo (RBMC) do IBGE, todavia a distância dessa estação para o ponto de monitoramento mais distante na estação do rio Madeira chega a 130 km. Torna-se necessária, assim, a instalação de pelo mais uma estação de forma a melhorar o conhecimento da variação vertical e auxiliar o processamento dos dados GPS.

Nesse sentido, buscou-se escolher o melhor local para a instalação da estação, analisando-se a área de abrangência do projeto. A partir de séries do satélite GRACE, que, conforme descrito anteriormente, é capaz de estimar através de seus dados gravimétricos variações verticais da crosta terrestre, foi feita uma análise dos dados gravimétricos do GRACE, onde foi detectado um sinal maior de movimento vertical na foz do rio Madeira em comparação com a estação da RBMC em Manaus. Portanto, com o objetivo de adensar a rede de estações permanentes GPS e avaliar, com melhor



qualidade, a distribuição de movimentos verticais da superfície terrestre, foi instalada a estação permanente de URUK na cidade de Urucurituba nas margens do rio Madeira (Figura 6.4).



**Figura 6.4- Estação permanente GPS de URUK na cidade de Urucurituba nas margens do rio Madeira.**

Na instalação de estações permanentes GPS, uma questão fundamental é a estabilidade do marco no local, onde se recomenda a instalação de estações em regiões de afloramento de rochas ou se fazendo fundações que ofereçam estabilidade à estrutura. Entretanto, na região Amazônica, e principalmente na proximidade dos rios, é bastante difícil encontrar regiões estáveis. Na tentativa de se ter uma instalação mais segura quanto à estabilidade geotécnica da seção, optou-se por local em Urucurituba, lugar este em que ainda é possível ver alguns afloramentos, implantando-se, então, uma fundação de concreto com pilar em profundidade de aproximadamente 2 metros. Durante as campanhas, é realizada a manutenção da estação permanente, sendo efetuados eventuais reparos e feito a coleta dos dados das observáveis GPS armazenadas no receptor.

### 6.3 Nivelamento das Estações Fluviométricas

Durante as nove (9) campanhas realizadas, foram feitos os nivelamentos altimétricos a partir da ocupação por receptores GPS das quatro (4) estações instaladas (Santa Luzia, Porto União, Iracema e Urucurituba) e das duas (2) já existentes (Balbina e Manaus), de forma a garantir que, posteriormente, os dados adquiridos das estações fluviométricas estejam sob a mesma referência altimétrica dos dados de altimetria espacial.

As estações, sempre que possível, foram reocupadas por receptores GPS periodicamente durante as nove (9) campanhas, pelo maior tempo possível, de modo a gerar uma boa série de levantamentos para avaliação de possíveis deslocamentos devido à instabilidade das estações.

A ocupação da estação por receptores GPS é feita de forma a dar uma boa estabilidade à antena do receptor, aliando-se a condições de não interferência dos sinais GPS e segurança do receptor quando deixados na estação durante toda a duração da campanha. Esses receptores podem ser posicionados nos lances das réguas, em uma referência de nível (RN) (Figura 6.5) ou em algum local para posterior nivelamento geométrico da antena para a referência de nível.

Para construção de uma RN, é feito o marco em um lugar mais distante do rio, procurando-se regiões mais estáveis. Normalmente, é feito um furo ou poço com profundidade de um metro ou maior, onde é colocada uma caixa de molde com dimensões aproximadas de 40 por 40 centímetros, sendo ainda feita a mistura de concreto para assim garantir melhor estabilidade do marco.

Adicionalmente, mede-se a diferença de altura entre o ponto de referência da antena e o valor da cota arbitrária da RN, permitindo a posterior correção das leituras das réguas feitas pelo aqui denominado observador hidrológico.

Como diretriz de instalação, as estações fluviométricas possuem, no mínimo, duas (2) referências de nível de valor altimétrico arbitrário usado para que os lances de réguas linimétricas sejam nivelados. Normalmente, escolhe-se um valor estimado abaixo do nível mínimo que o rio possa chegar, de forma que as leituras feitas pelo observador ou hidrometrista sobre a régua sejam sempre positivas. A Figura 6.6 ilustra a ocupação ou complementação de uma estação fluviométrica tradicional com receptores GPS.



**Figura 6.5- Referência de nível (RN) utilizada para nivelamento das réguas limimétricas, com referência arbitrária.**



**Figura 6.6- Ocupação de um lance de régua por receptor GPS para nivelamento da estação fluviométrica de Porto União.**

Ao contrário das referências de nível (RRNN), os lances de réguas linimétricas são fortemente afetados pelo ciclo hidrológico, que causa uma grande erosão nas margens dos rios, causando deslocamento e até, às vezes, tombamento de alguns dos lances de réguas (Figura 6.7). Durante as campanhas, são feitos nivelamentos geométricos entre os lances e as referências de nível de forma a verificar e corrigir possíveis deslocamentos entre os lances e as RRNN.



**Figura 6.7- Forte erosão que afeta as seções de réguas linimétricas e o nivelamento geométrico.**

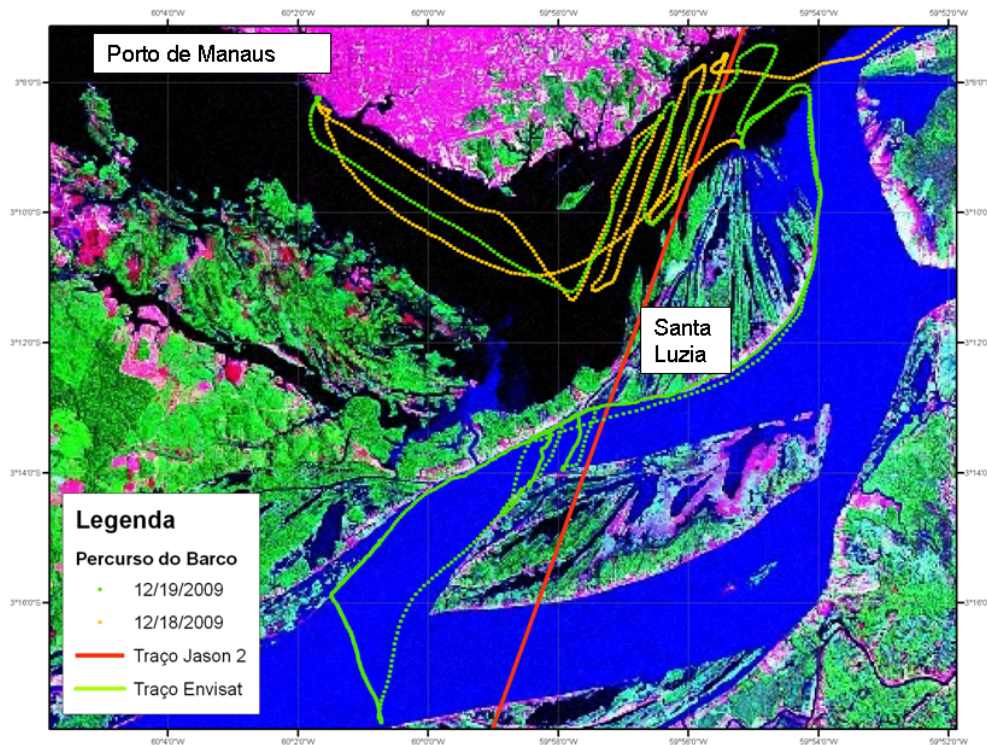
#### **6.4 Coleta de Dados da Declividade da Linha de Água**

Durante o período de execução das campanhas de campo, são instalados receptores GPS no barco de forma a monitorar o seu deslocamento e para posterior obtenção de dados sobre a declividade da linha de água.

Próximo às estações e linhas de passagens dos satélites altímetros, são executadas linhas de medição para obtenção de dados cinemáticos por receptores GPS com objetivo de formar uma grade da declividade de linha de água na região de estudo. Essas

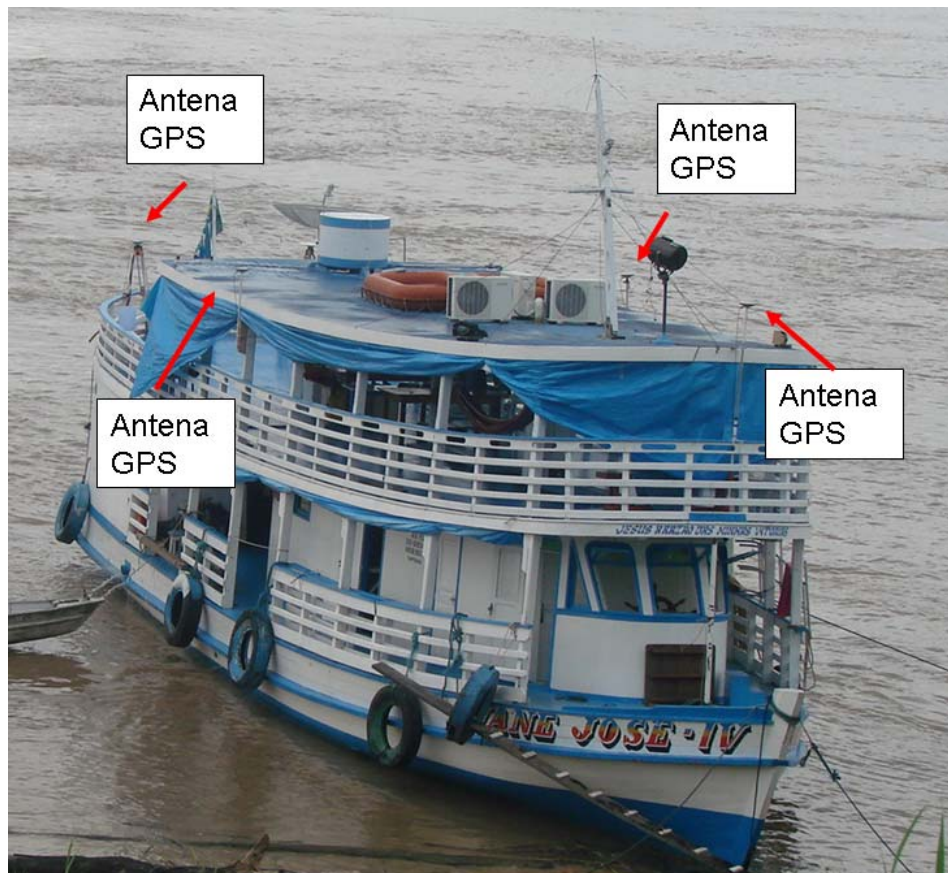


medidas são realizadas de forma a considerar a variabilidade espacial das medidas obtidas pelo satélite, também sendo levantada a declividade elipsoidal entre o local de passagem do satélite e a estação fluviométrica para uma comparação mais correta dos dados de altimetria espacial e dados provenientes das régua linimétricas. Esses percursos em cada estação são similares aos apresentados na Figura 6.8.



**Figura 6.8- Exemplo de percurso do barco realizado para medições da declividade da linha de água.**

Quando é possível, dependendo da disponibilidade de equipamentos, são instalados mais de um receptor GPS sobre o barco, com objetivo da distribuição espacial dos receptores possibilitar a redução dos efeitos de movimento do barco causados por ondas, vento, correnteza e variações de velocidade do barco (Figura 6.9).



**Figura 6.9- Instalação de receptores e antenas GPS sobre o barco.**

Durante as campanhas, também é realizado, em vários períodos, o nivelamento das antenas sobre o barco em relação ao nível de água, pois o GPS mede suas coordenadas baseado na posição do centro de fase da antena. Então, faz-se necessário reduzir as alturas do centro de fase da antena para o nível da linha de água, para assim, posteriormente, obter o perfil de linha de água (Figura 6.10).



**Figura 6.10- Nivelamento de antenas GPS sobre o barco.**

Para os levantamentos cinemáticos de perfil da linha de água, foi construída uma prancha flutuante de forma a possibilitar o uso com lanchas e atingir locais inacessíveis ao barco de forma a complementar as medições por receptores GPS de linha de água, regiões estas como, por exemplo, o reservatório de Balbina, entre outros lagos e zonas inundáveis da bacia Amazônica (Figura 6.10).



**Figura 6.11- Medições de linha de água a partir do GPS flutuante.**

## 6.5 Medições de Correntômetros Acústicos de Efeito Doppler (ADCP)

No âmbito desta pesquisa, foram ainda realizadas medições com ADCP (*acoustic doppler current profiler*), que se trata de um equipamento acústico de efeito Doppler que obtém um perfil das correntes ou velocidades da água. O ADCP também estima a profundidade do rio, possibilitando, mediante o acesso ao dado de velocidade e de área da seção fluviométrica, estimar a vazão do rio (Figura 6.11).

Em geral, neste trabalho o objetivo principal das medições ADCP consiste na obtenção da profundidade da seção durante as medições GPS, fato que auxilia a navegação segura do barco. Os dados da seção batimétrica, obtidos a partir dos equipamentos GPS instalados no barco, também serão nivelados ao elipsóide de referência, o que torna possível o seu uso futuro em diversos modelos hidrodinâmicos.

O emprego dos valores de profundidade e vazão também permite chegar a uma melhor interpretação sobre a obtenção das variações na declividade elipsoidal da linha de água, que pode ser provocada por efeitos hidrodinâmicos e variações do geóide causadas pela diferença de densidade de materiais provocada pela proporção da quantidade de água em relação a outros materiais que compõem a crosta terrestre.

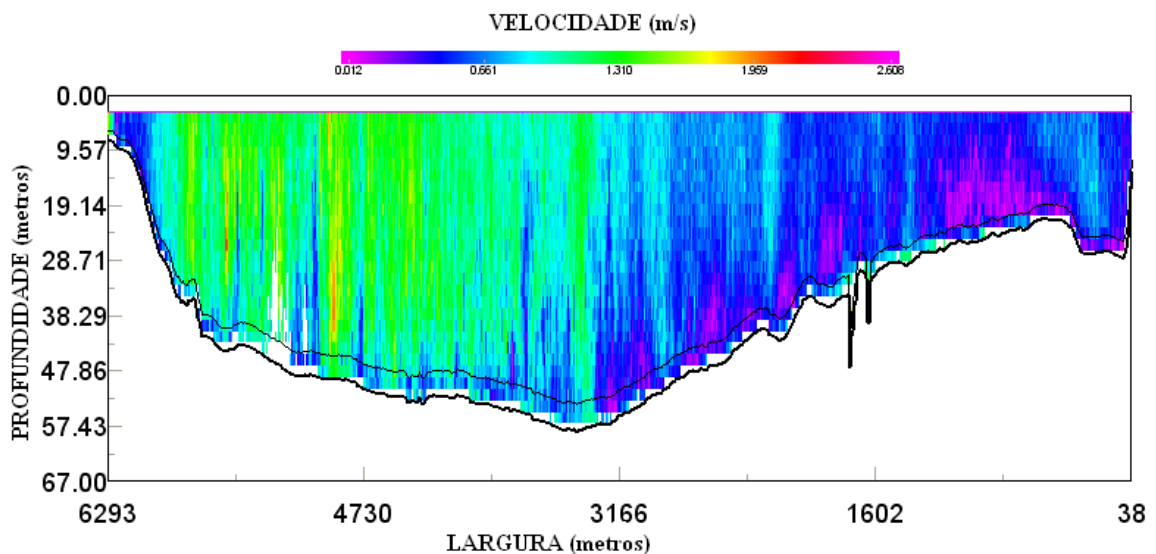


Figura 6.11- Exemplo de seção batimétrica obtida por ADCP.



## CAPÍTULO 7 – RESULTADOS

Neste Capítulo, serão descritos os resultados obtidos durante a realização do presente trabalho, ilustrando-os ao longo do texto da dissertação. Por outro lado, cabe destacar as propriedades espaciais e temporais dos resultados obtidos, que refletem as quatro dimensões dos resultados, fazendo que alguns destes, principalmente os de deslocamento do barco, sejam melhor expressos mediante meios digitais e códigos computacionais adequados.

Nesse sentido, é válido ressaltar que os resultados descritos a seguir estão disponíveis em seu formato e informações completas nos órgãos que financiaram, apoiaram e participaram da execução do presente estudo, sendo estes CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais) - <http://www.cprm.gov.br>, IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) - <http://www.brasil.ird.fr> e LABHID (Laboratório de Hidrologia), hoje parte do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ - <http://www.labhid.info>.

Os resultados expressos, na seqüência, serão apresentados em itens respeitando-se a ordem cronológica dos processos executados, consoante estabelecidos no Capítulo 5 mediante a Figura 5.1, que se resumem em:

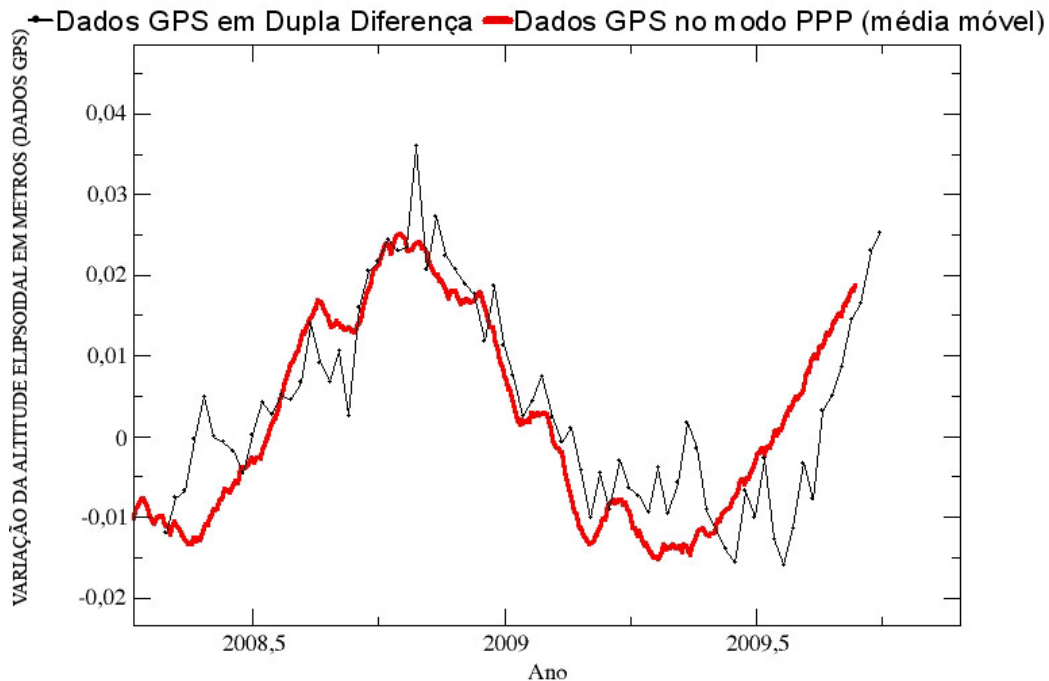
- resultados dos cálculos das coordenadas verticais das estações GPS permanentes e comparação com resultados dados pelo GRACE e medições de nível de água; descrito no item 7.1;
- resultados dos nivelamento por receptores GPS das estações fluviométricas, definindo o valor elipsoidal da escala zero das régua linimétricas ao longo do tempo e estabelecimento de uma equação de relação entre o nivelamento e o nível de água ao longo do tempo; descrito no item 7.2;
- resultados dos perfis de linha de água adquiridos via receptores GPS ao longo das linhas de passagem dos satélites altímetros, sendo os valores elipsoidais obtidos comparados com o modelo de geóide EGM08, a fim de descrever corretamente as características hidrodinâmicas do trecho de estudo; descrito no item 7.3;
- resultados de aplicações ligadas a estudos hidrológicos, destacando-se a importância de levantamentos por receptores GPS na obtenção de

características hidráulicas e importância de estabelecimento de uma referência única altimétrica para estações fluviométricas; descrito no item 7.4.

### 7.1 Solução das Coordenadas Verticais das Estações Permanentes GPS

Foram, inicialmente, comparadas as soluções semanais de dupla diferença e soluções diárias do método de posicionamento por ponto preciso (PPP) com o objetivo de escolher qual desses métodos representa melhor a variabilidade das coordenadas altimétricas da área de estudo. Como visto no capítulo anterior, o método PPP apresenta uma solução independente, enquanto que o método de dupla diferença baseia-se nas diferenças entre as estações a serem processadas. Como descrito anteriormente, o método PPP é conceitualmente menos preciso devido à estimação de ambigüidades reais e à não correlação com outras estações para melhor atenuação de efeitos atmosféricos.

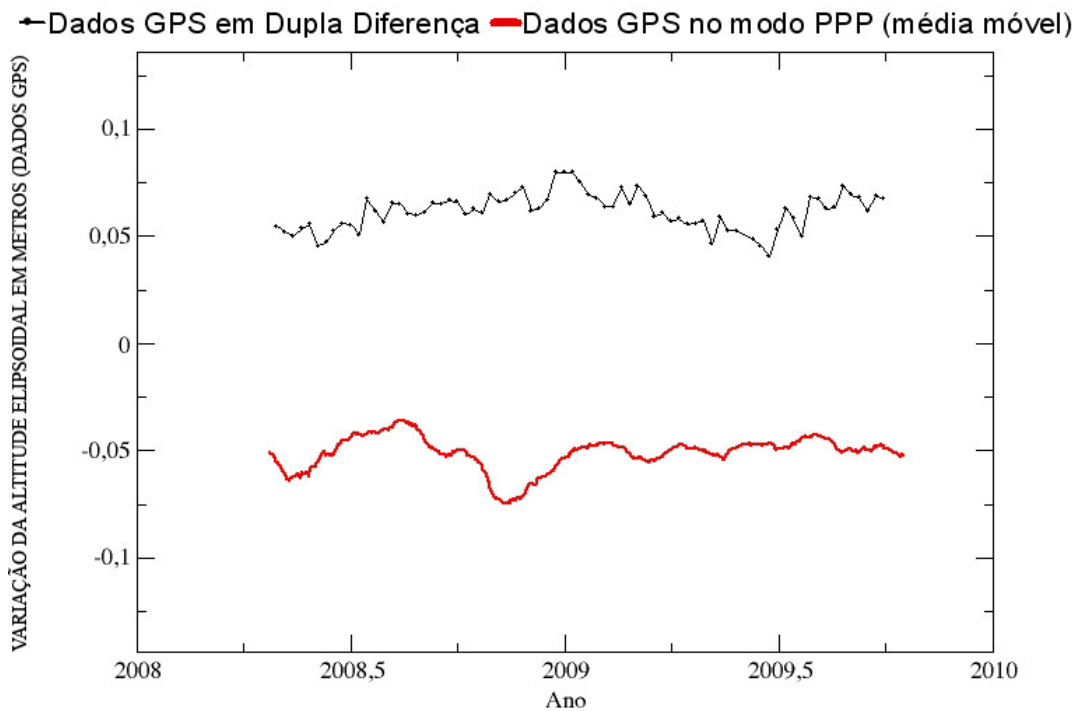
A Figura 7.1 mostra os resultados dessa comparação para os dados obtidos na estação de Porto Velho (POVE), localizada no estado de Rondônia e que faz parte da rede RBMC do IBGE.



**Figura 7.1- Comparação entre os métodos PPP e de dupla diferença em POVE.**

A partir da comparação entre as duas soluções mostradas na Figura 7.1, pode-se detectar que não foi observada a estabilidade esperada nas soluções semanais de dupla diferença. Contudo, a variação das coordenadas foi praticamente a mesma segundo os método PPP e dupla diferença, com desvios em relação à coordenada inicial fornecida pelo IBGE referente à época de 2000,4 adotada pelo sistema geodésico brasileiro.

A seguir, é apresentada essa mesma comparação efetuada para os dados correspondentes à estação de Marabá (MABA), no estado do Pará, também pertencente à rede RBMC.

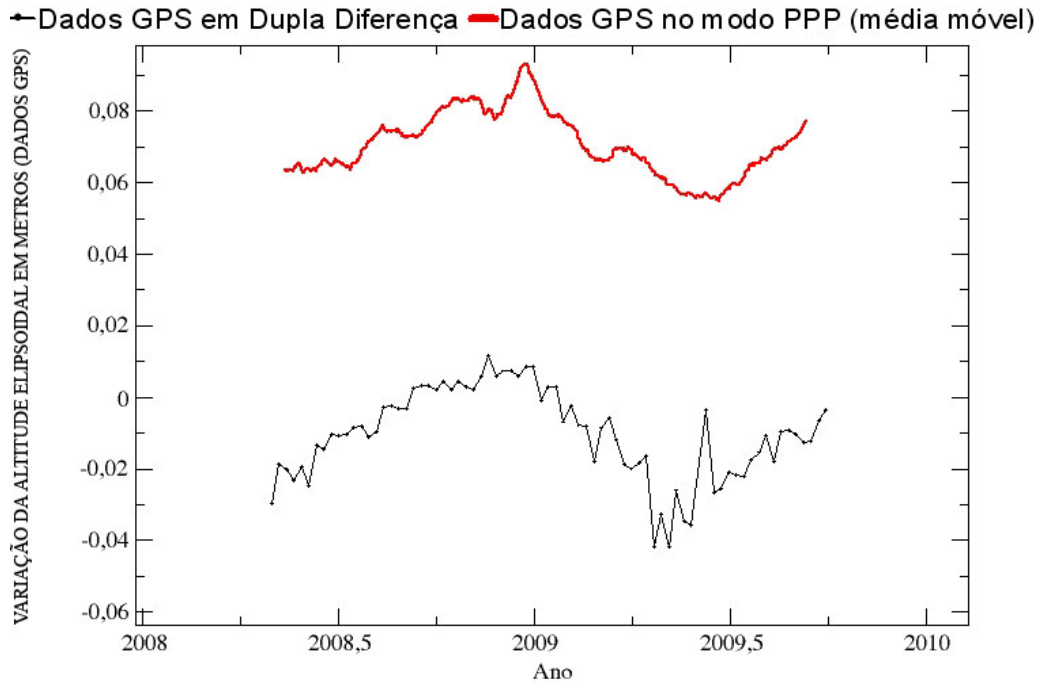


**Figura 7.2- Comparação entre os métodos PPP e de dupla diferença em MABA.**

Pela comparação dos métodos, a característica notória é o deslocamento entre as séries: a aplicação do método de dupla diferença resultou em um deslocamento positivo de cinco (5) centímetros em relação à coordenada de entrada fornecida pelo IBGE, enquanto que o método PPP resultou em um deslocamento negativo de cinco (5) centímetros. Contudo, como o método PPP é uma solução independente, e sua série superior a 400 dias de dados processados, o deslocamento obtido da série PPP é mais representativo. O método de dupla diferença, usado tanto na solução da rede do IBGE quanto a rede utilizada neste trabalho, provavelmente apresenta deslocamentos verticais

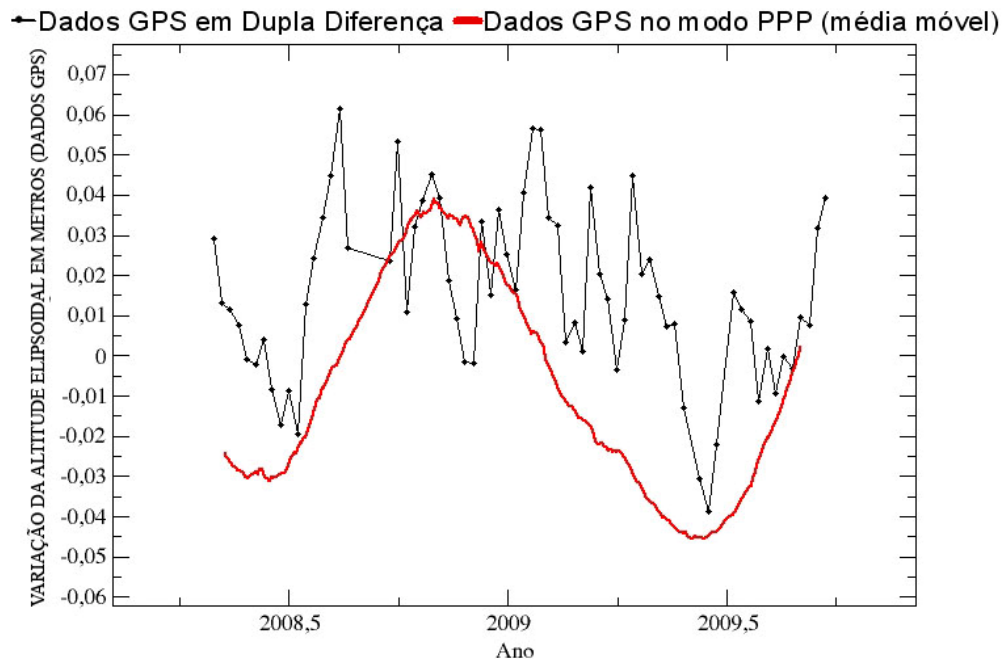
provenientes da rede escolhida para ajuste, devido a inconsistências não modeladas nas coordenadas verticais estabelecidas para as estações de referência utilizadas.

A seguir, é apresentada a comparação da estação da RBMC em Macapá (MAPA) no estado do Amapá (Figura 7.3). Como visto anteriormente, para a estação MABA (Figura 7.2), nota-se também um deslocamento entre as séries, reforçando mais ainda a questão desse deslocamento ser provocado no ajustamento entre estações via método de dupla diferença.



**Figura 7.3- Comparação entre os métodos PPP e de dupla diferença em MAPA.**

Na Figura 7.4, é apresentada a comparação das soluções obtidas pelos dois métodos para a estação de Urucurituba (URUK), localizada no estado do Amazonas.



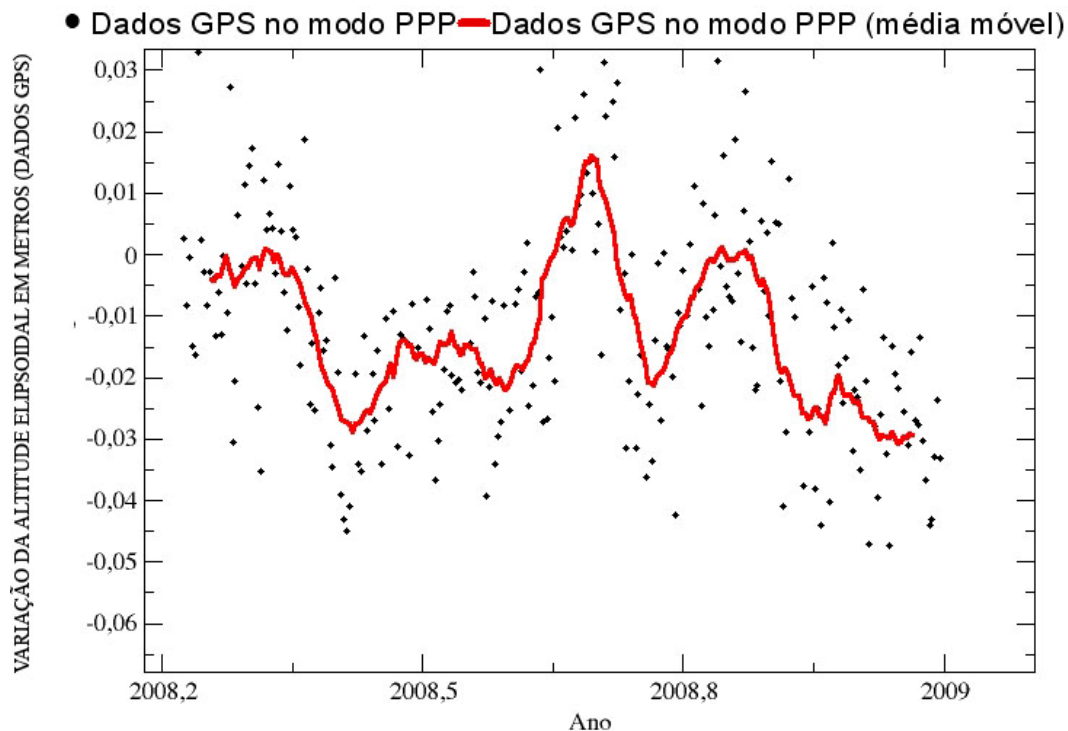
**Figura 7.4- Comparação entre os métodos PPP e de dupla diferença e em URUK.**

Como visto na Figura 7.4, a comparação entre os dois métodos na estação de URUK levou aos piores resultados. Como será visto adiante, esse resultado foi semelhante ao encontrado na estação de NAUS, distante apenas 120 km da estação de URUK. Segundo BEVIS *et al.* (2005), sabe-se que a oscilação do receptor GPS de NAUS é fortemente correlacionada com a variação do nível de água do rio Negro. A solução PPP é mais apropriada para essa correlação, pelo fato das deflexões do GPS estarem melhor relacionadas ao período de seca, tendo seu mínimo aproximadamente em dezembro e o período de cheia com pico aproximado em junho, fazendo com o que o receptor GPS tenha movimentos esperados de acordo com o ciclo hidrológico descrito anteriormente por BEVIS *et al.* (2005).

Assim, a partir da análise da comparação entre os métodos da dupla diferença e do PPP para as quatro (4) estações acima apresentadas, verificou-se que a solução de dupla diferença apresentou resultados não satisfatórios. Um fator que pode justificar esse mau desempenho é a distribuição de erros durante o processamento de dupla diferença; esses erros podem ser provenientes de diversas causas, como, por exemplo, problemas com uma estação particular, o que contaminaria toda a rede. Uma característica importante diz respeito aos diferentes períodos de instalação das estações permanentes e

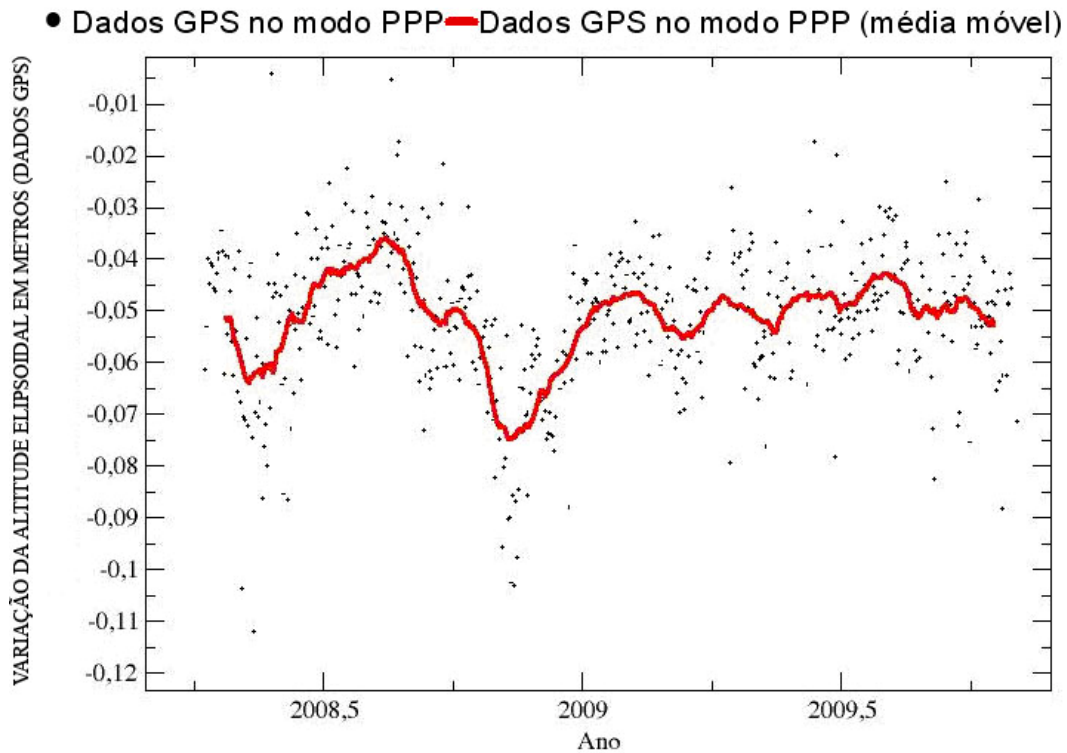
à determinação de suas coordenadas. As coordenadas são calculadas em uma rede em diferentes períodos para cada estação e ajustadas, de forma regressiva no tempo, para a época de realização do sistema geodésico. Contudo a regressão só analisa as variações horizontais, não sendo as velocidades verticais levadas em consideração, levando a que, então, as coordenadas verticais sejam dependentes da época do levantamento.

Nas Figuras 7.5, 7.6 e 7.7, são mostradas as variações das coordenadas nas estações de referência do ITRF2005, utilizadas como estações fixas neste trabalho, quais sejam, Christiansted (CRO1) nas Ilhas Virgens (Figura 7.5), Manágua (MANA) na Nicarágua (Figura 7.6) e Santiago (SANT) no Chile (Figura 7.7). As posições espaciais dessas estações podem ser vistas na Figura 5.5 do Capítulo 5.



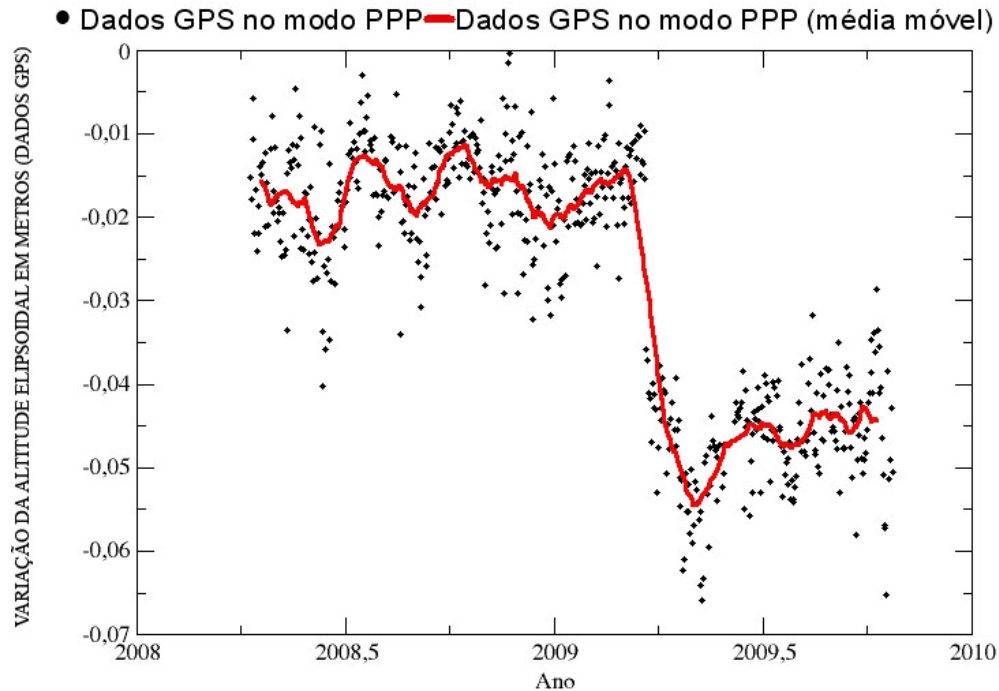
**Figura 7.5- Variação vertical na estação CRO1 do IGS e referência para o ITRF2005.**

Apesar de ser uma estação utilizada como referência na realização do ITRF2005, a estação de CRO1 apresenta deslocamentos verticais acentuados da ordem de três (3) centímetros em relação a sua coordenada fixa durante o período de estudo. A sua utilização como estação fixa para o método de dupla diferença certamente ocasionou erros na obtenção de coordenadas de outras estações.



**Figura 7.6- Variação das coordenadas verticais da estação MANA do IGS e ITRF2005.**

A estação MANA também apresenta variações em sua coordenada vertical, da ordem de dois (2) centímetros. Além disso, verifica-se um deslocamento sistemático negativo de cinco (5) centímetros em relação ao valor de sua coordenada oficial do ITRF2005. Provavelmente, esse deslocamento é devido à variação da coordenada vertical em relação à época de 2000, data de referência para coordenadas do ITRF2005. Esses erros também se propagam pela rede, dificultando, desse modo, o processamento de dupla diferença e justificando os maus resultados obtidos quando da aplicação da técnica de dupla diferença.



**Figura 7.7- Variação vertical das coordenadas da estação SANT do IGS e referência para o ITRF2005.**

A estação SANT também apresenta deslocamento em sua série em relação à coordenada oficial do ITRF2005, além de oscilações verticais. Destaca-se o salto negativo da série em abril de 2009. Como nenhum abalo sísmico foi registrado nesse período, não se pôde, até o presente, justificar esse deslocamento. De qualquer forma, esse deslocamento foi incorporado à solução da rede de dupla diferença, ocasionando erros na solução.

Por todos esses motivos, o método PPP foi o escolhido para representar a variação das coordenadas verticais das estações na bacia Amazônica utilizadas nesta dissertação.

### 7.1.1 Indicadores da Qualidade da Solução escolhida PPP

Dois indicadores foram escolhidos para representar a qualidade dos dados verticais disponibilizados:

- o nível de água - as grandes variações de vazão/volume que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Amazonas constituem a principal causa das variações não modeladas das coordenadas verticais nesta região; assim, espera-se que a

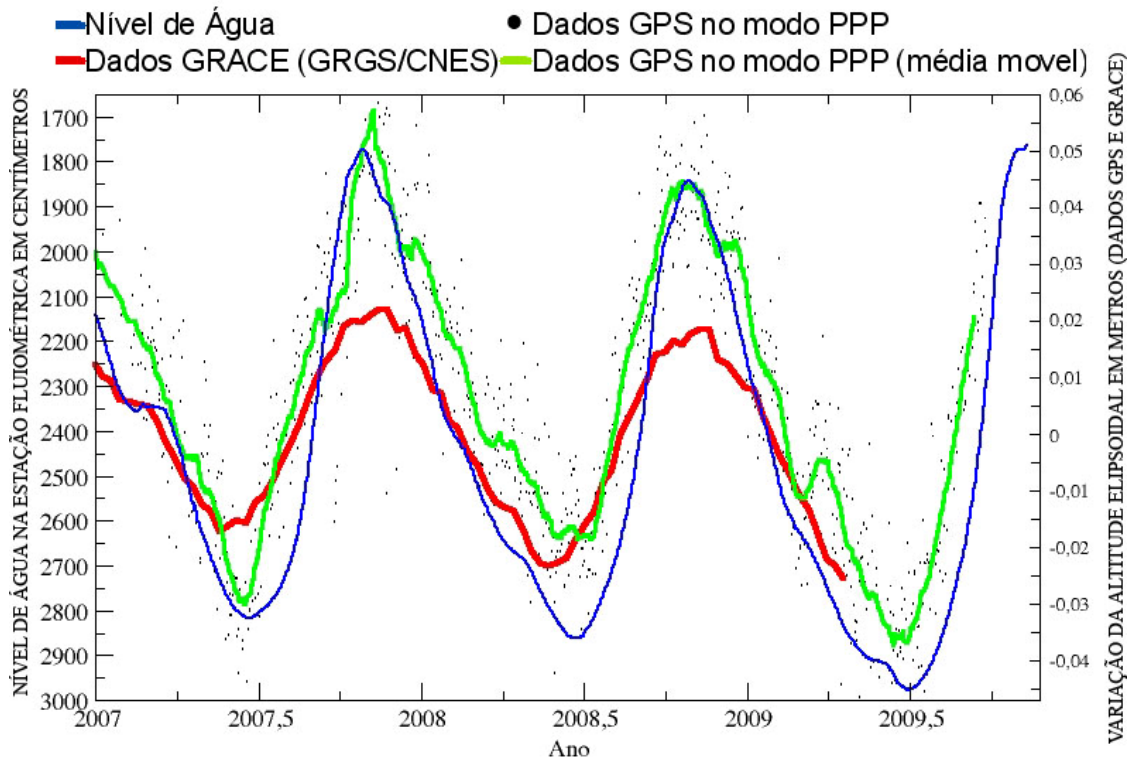


variação do nível de água esteja fortemente correlacionada com as variações de coordenadas detectadas nas estações GPS; crítica - os receptores GPS medem variações totais de deslocamento vertical, mas nem todos se devem à variação de massa de água superficial: há os efeitos de pressão atmosférica, águas subterrâneas;

- as séries de soluções GRACE/GRGS - espera-se que essas séries, correspondentes às variações de massa/gravidade, expressas como deformação radial a partir da estimação da variação de volume de água equivalente, estejam correlacionadas com as séries de variação medidas nas estações GPS; críticas - (1) GRACE: dados de baixa resolução 300-400 km; GPS: dados pontuais; (2) correção das variações nos dados GRACE dos efeitos de pressão atmosférica feita de forma aproximada (dados do modelo ECMWF).

As comparações foram realizadas em cinco estações: Manaus (NAUS), São Gabriel da Cachoeira (SAGA), Porto Velho (POVE), Marabá (MABA) e Macapá (MAPA). Verificou-se que a amplitude das variações de coordenada vertical encontradas em Manaus correspondem ao dobro das encontradas em Porto Velho, e ao quádruplo das encontradas em São Gabriel da Cachoeira. Em todas essas estações, havia a disponibilidade de dados de variação diária de nível de água (fonte: HIDROWEB/ANA).

A primeira comparação foi feita entre a estação fluviométrica do Porto de Manaus com código 14990000 (HIDROWEB/ANA), estação GPS de NAUS da RBMC/IBGE e série do GRACE extraída do GRGS/CNES extraída para coordenada de NAUS. Na Figura 7.8, são apresentadas essas três séries.

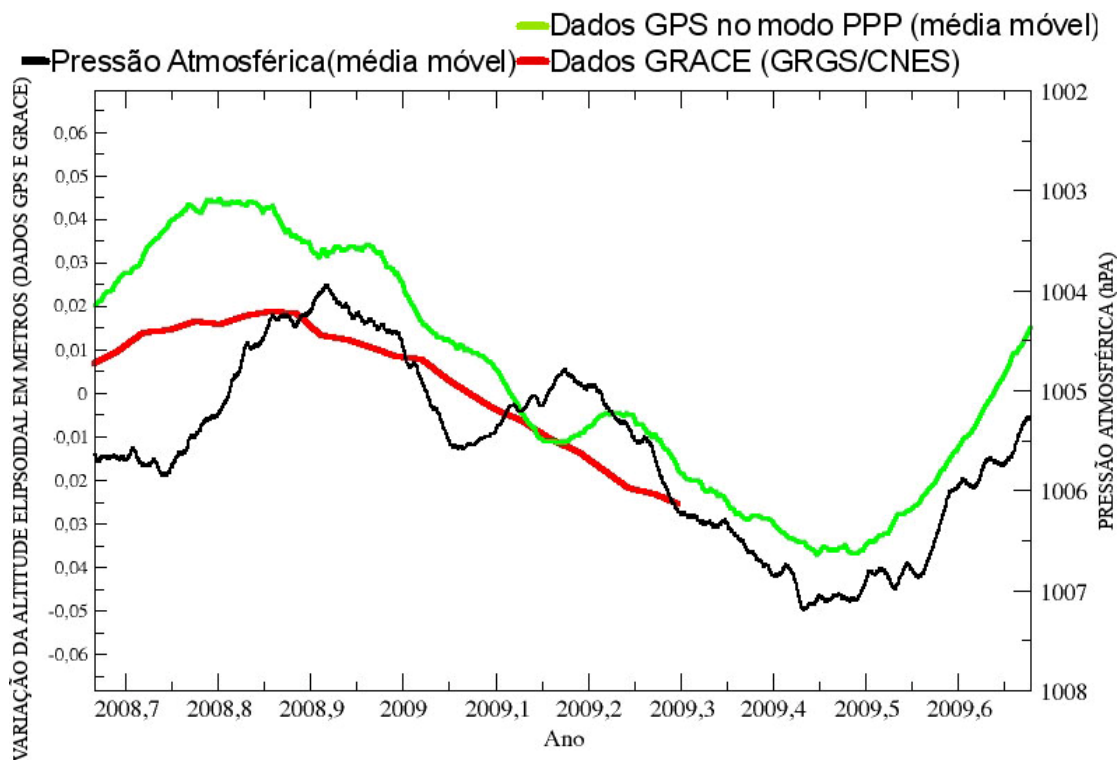


**Figura 7.8- Comparação com deslocamentos verticais dados pela série GRACE, GPS e nível de água da estação fluviométrica em Manaus.**

Os resultados apresentados acima sugerem a existência de uma forte correlação entre as medidas, diretas e aproximadas, de variação de coordenada vertical. Contudo o GRACE certamente tem um fator de calibração dos efeitos provavelmente associados ao modelo de Terra na sua resposta da variação gravitacional e deslocamento vertical. A correlação do GPS de NAUS com a estação do nível de água comprova o resultado apresentado anteriormente no trabalho de BEVIS *et al.* (2002). Porém uma variação vertical superior à apresentada em BEVIS *et al.* (2002) (7,5cm) foi encontrada neste trabalho. Como pode ser visto na Figura 7.8, variações de cerca de 10 cm de amplitude foram encontradas, fato que pode ser justificado por uso de séries temporalmente mais longas do que as usadas por BEVIS *et al.* (2002).

Quanto às soluções de posicionamento GPS obtidas pelo método PPP, de boa correlação com os dados de nível de água, verificou-se uma diferença marcante entre essas séries no ano de 2009, onde a enorme variação de nível atingindo a cota de 29,77 metros correspondente à maior cheia já registrada nessa estação em seus mais de 100 anos de dados fluviométricos condiz com o maior deslocamento vertical dado pelo GPS.

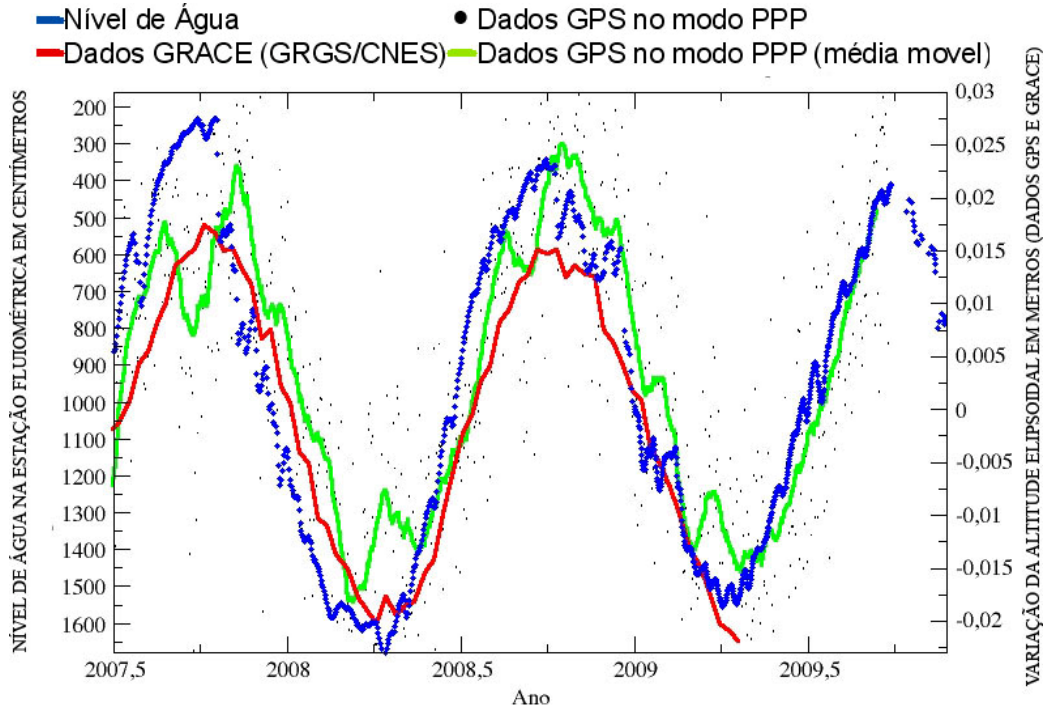
Contudo esse resultado pode ser justificado pela influência, nas séries GPS e de nível d'água, de outros efeitos e fenômenos não corretamente modelados ou corrigidos, tais como a carga atmosférica, água subterrânea e a umidade do solo. O GRACE também responde melhor à determinação da maior cheia, todavia o GRACE não possui os efeitos de carga atmosférica contabilizados. Em uma tentativa de explicar a influência de cargas atmosféricas, utilizaram-se os dados da estação meteorológica de Manaus disponibilizados pelo INMET (*Instituto Nacional de Meteorologia*) no seu sítio de internet <http://www.inmet.gov.br>. No curto período mostrado na Figura 7.9, pode-se notar a variação da pressão atmosférica, a principal variável causadora dos fenômenos de carga atmosférica.



**Figura 7.9 – Comparação entre a pressão atmosférica e variações dadas pelo GRACE e GPS.**

Na Figura 7.9, nota-se uma boa correlação entre as diferenças dadas pelo GRACE e GPS em comparação com a pressão atmosférica, contudo é preciso analisar o tempo de resposta do efeito da pressão atmosférica, pois o efeito da variação atmosférica parece ter um tempo de resposta maior para que efetivamente seja notado o efeito de carga.

Abaixo (Figura 7.10), segue a comparação feita em Porto Velho, utilizando a estação fluviométrica no rio Madeira de código 15400000 (HIDROWEB/ANA) e dados GPS da estação POVE da RBMC/IBGE.



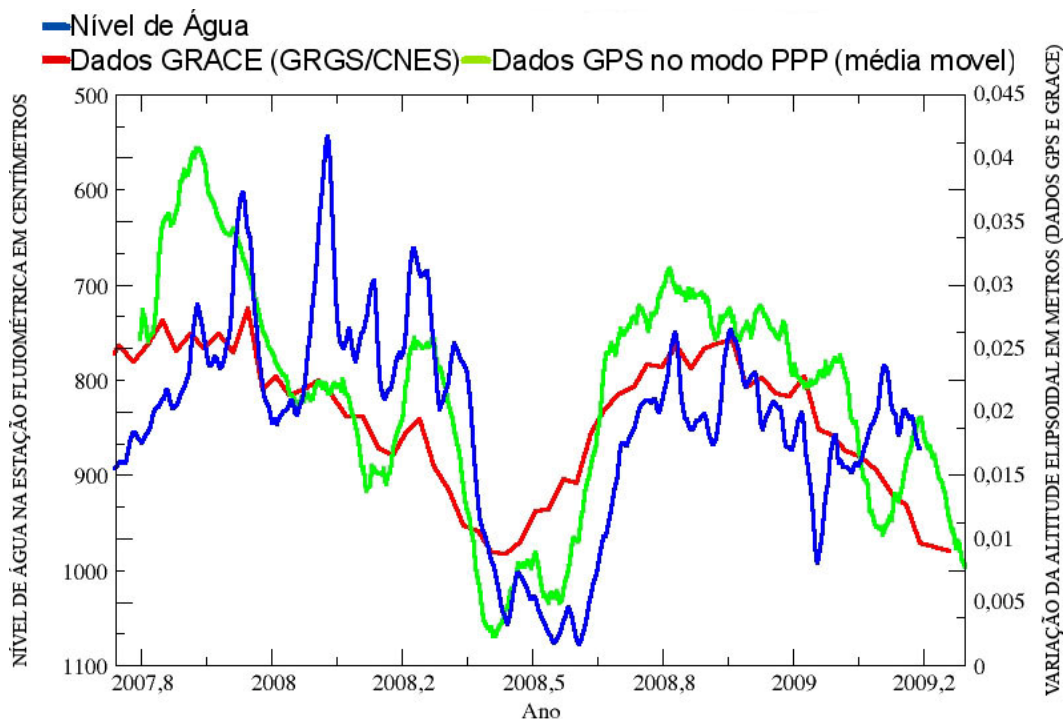
**Figura 7.10 – Comparação dos deslocamentos verticais entre as séries do GRACE, GPS e estação fluviométrica no rio Madeira.**

Nessa estação, foram verificadas as maiores correlações entre as três séries (GPS nível de água, e GRACE). A série de deslocamento vertical dada pelo GRACE ajusta-se melhor à série GPS, levantando-se a hipótese que se pode ter melhor ou pior ajuste entre as séries GRACE e GPS dependendo da região, precisando-se ter sua correção de deslocamento e potencial na série GRACE melhor analisada de acordo com a região. Entre as justificativas da boa correlação entre o nível de água e GRACE, podem ser citadas: (1) as variações de massa expressas pelas soluções GRACE devem-se preponderantemente às grandes variações de volume/cota, sendo o possível efeito da variação de água no solo não tão relevante nesse local; (2) as soluções GRACE representam de forma relativamente homogênea a hidrologia da bacia.

Entre as soluções de GPS, GRACE e nível de água, pode-se considerar que as variações de carga atmosférica são pequenas quando confrontadas às variações de carga

hidrológica, levando a que a hipótese do modelo de Terra utilizado no GRACE se adapte melhor a essa região.

Na Figura 7.11, é apresentada a comparação feita em São Gabriel da Cachoeira no alto rio Negro, utilizando-se a estação da RBMC SAGA e a estação fluviométrica de São Gabriel da Cachoeira de código 14320000 (HIDROWEB/ANA).

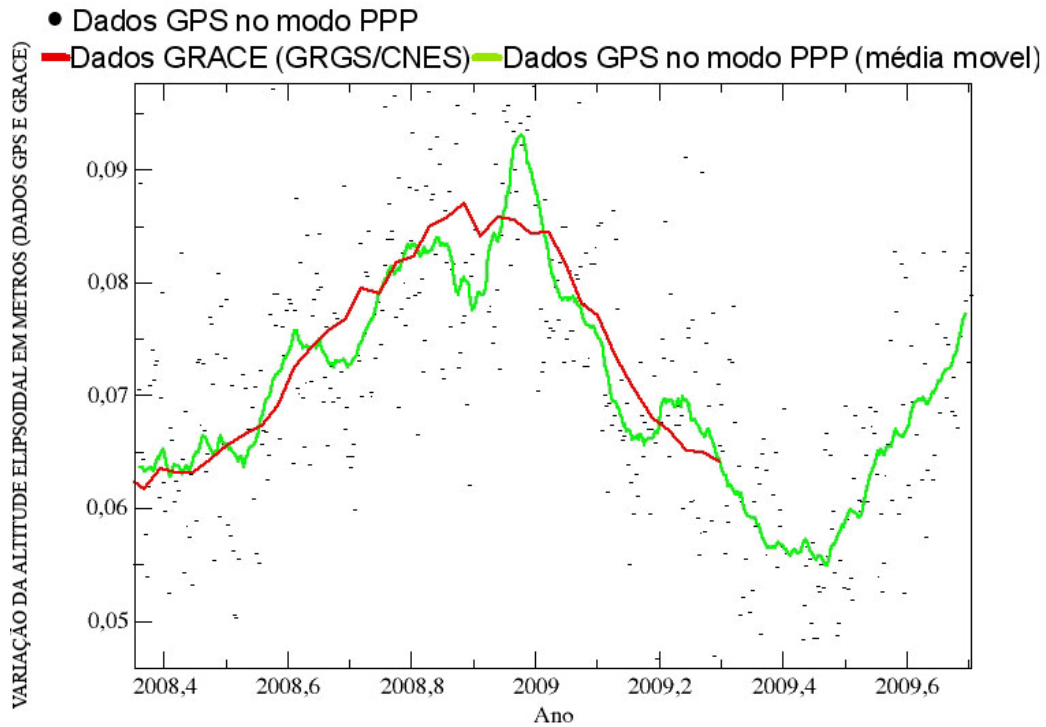


**Figura 7.11- Comparação de deslocamentos verticais GPS, GRACE e estação fluviométrica em São Gabriel da Cachoeira.**

São Gabriel não apresenta uma correlação tão boa entre as séries de GPS, GRACE e nível de água. Esse resultado justifica-se, pois São Gabriel possui uma variação no ciclo hidrológico bastante inferior a de Manaus e Porto Velho, fato que pode aumentar a influência de outros fatores na carga exercida pela variação do nível, a se considerar a influência da carga atmosférica e efeitos das águas subterrâneas e umidade no solo. Entretanto a simples relação de alguns sinais de variação de nível de água com efeitos de carga já apresenta bons indícios na validade das aplicações GPS e GRACE na determinação desse tipo de fenômeno.

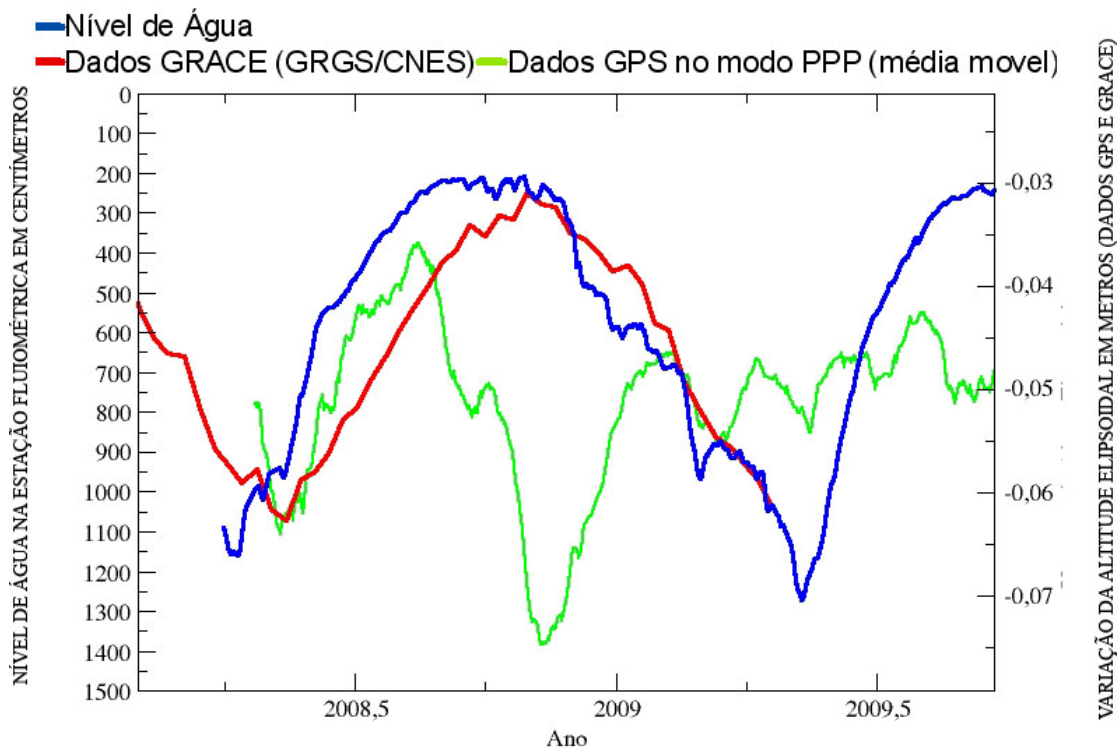
Para a comparação em Macapá, no estado do Amapá, foram utilizadas somente a série GRACE e a estação GPS MAPA, não sendo empregado o nível de água, devido ao rio Amazonas em Macapá estar sendo influenciado pelo regime das marés, sendo

inapropriado o uso das séries fluviométricas. Como visto na Figura 7.12, a comparação mostrou uma boa correlação entre os dados GRACE e GPS.



**Figura 7.12 – Comparação GRACE e GPS em Macapá.**

Já em Marabá no Pará pode-se usar o nível de água da estação fluviométrica do rio Tocantins de código 29050000 (HIDROWEB/ANA) para a comparação entre a estação fluviométrica, a estação permanente da RBMC de MABA, a série GRACE do ponto da estação MABA e a série GRACE na estação de NAUS.



**Figura 7.13 – Comparação entre séries GRACE e nível de água e estação GPS em Marabá.**

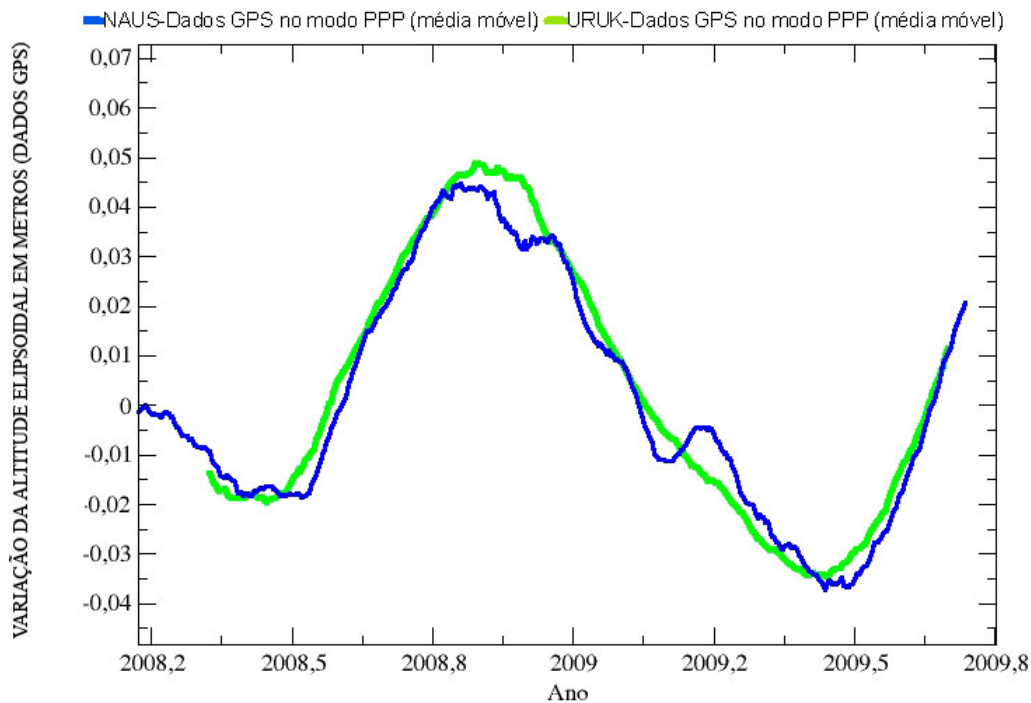
Na Figura 7.13 nota-se, pelo receptor GPS um efeito no sentido contrário ao movimento do nível de água e da série GRACE. Esse efeito não pôde ainda ser explicado, podendo ser originado por fenômenos percebidos de forma diferente pela a estação permanente. Contudo, pelos resultados positivos das comparações anteriores o resultado de MABA gera indícios para uma busca de maiores informações sobre uma certa instabilidade com a série da estação GPS, sendo recomendada uma análise da estabilidade do marco no qual se encontra a estação GPS de MABA.

## 7.2 Nivelamentos das Estações Fluviométricas

Após o conhecimento das variações hidrológicas nas estações GPS permanentes, a etapa seguinte é a escolha da estação ou estações que serão utilizadas no método de dupla diferença para nivelamento das estações fluviométricas. Apesar da maior eficiência do método PPP nas aplicações anteriores, o método de dupla diferença é mais recomendado para nivelamento das réguas, devido às ocupações das réguas por receptores GPS não serem em quantidade e duração suficientemente longas para



interpretação dos diversos efeitos na variação da coordenada vertical já anteriormente citados. Devido ao fato das estações fluviométricas se encontrarem entre as estações GPS permanentes de URUK e NAUS, distantes cerca de 130 quilômetros uma da outra, a comparação das coordenadas entre as estações de URUK e NAUS indicará a provável variação de coordenadas vertical no trecho, de modo a avaliar os efeitos de carga na área de estudo.



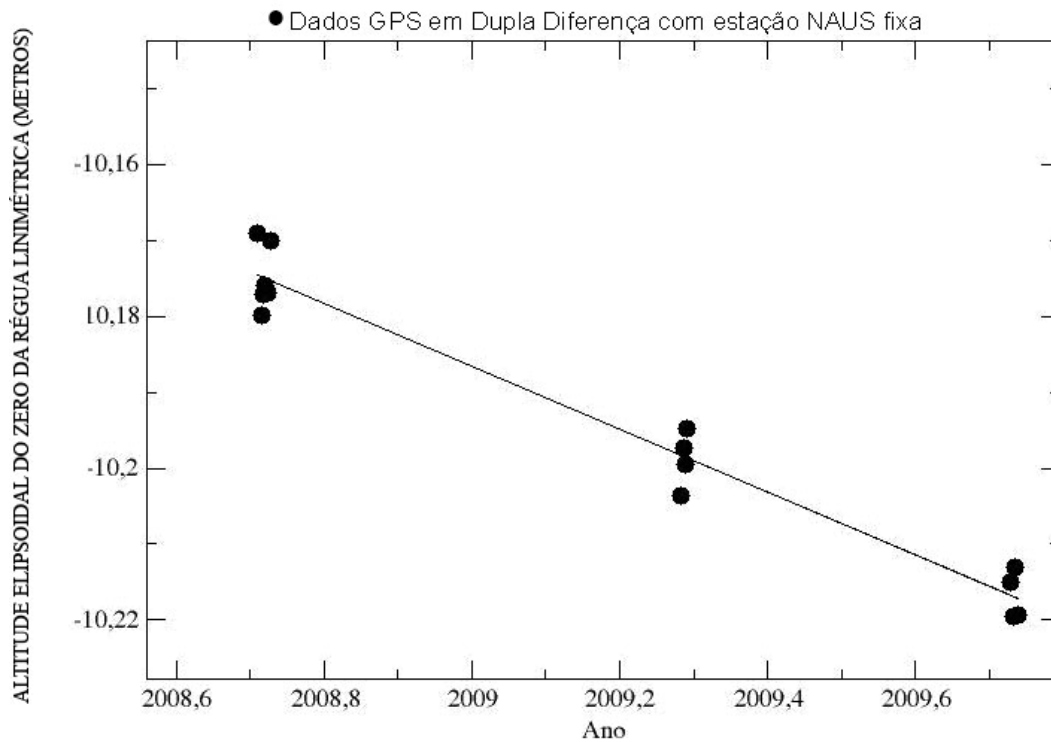
**Figura 7.14 - Comparação da variação de coordenadas altimétricas nas estações de URUK e NAUS.**

As variações de coordenadas entre NAUS e URUK indicam uma diferença de variação abaixo do centímetro, concordando com BEVIS *et al.* (2005), que estimaram a influência dos efeitos de Manaus em uma região de 200 km. Essas pequenas diferenças, provavelmente, são causadas por efeitos locais de menor magnitude que acontece nessas estações. A boa correlação também é uma boa garantia da estabilidade do marco onde foi fixada a estação URUK em Urucurituba, fator que era uma preocupação devido à grande instabilidade do solo no local.

Como as estações apresentam quase o mesmo deslocamento nos levantamentos GPS executados nas estações fluviométricas, os ajustes podem ser efetuados por dupla diferença, tanto usando as estações GPPS de NAUS ou URUK separadamente ou mesmo ambas as estações simultaneamente.



Na seqüência do texto, serão apresentados os nivelamentos das estações fluviométricas. Nas diversas ocupações das estações fluviométricas por receptores GPS, apenas a estação de Santa Luzia (Figura 7.15) indicou um deslocamento significativo em relação à estação permanente fixa GPS utilizada no processamento de dupla diferença. Esta estação de Santa Luzia fica em uma ilha fluvial, que divide o rio Negro do Solimões, conforme a Figura 6.1.



**Figura 7.15 – Deslocamento detectado no nivelamento da estação de Santa Luzia.**

A grande justificativa para esse deslocamento foram as cheias ocorridas na estação que, provavelmente, conforme mostra o levantamento GPS na Figura 7.15, provocaram deslocamento até mesmo das referências de nível. Nas Figuras 7.16 a 7.18, seguem fotos que comprovam a instabilidade do local.



**Figura 7.16 – Estação de Santa Luzia no período de seca de 2008.**



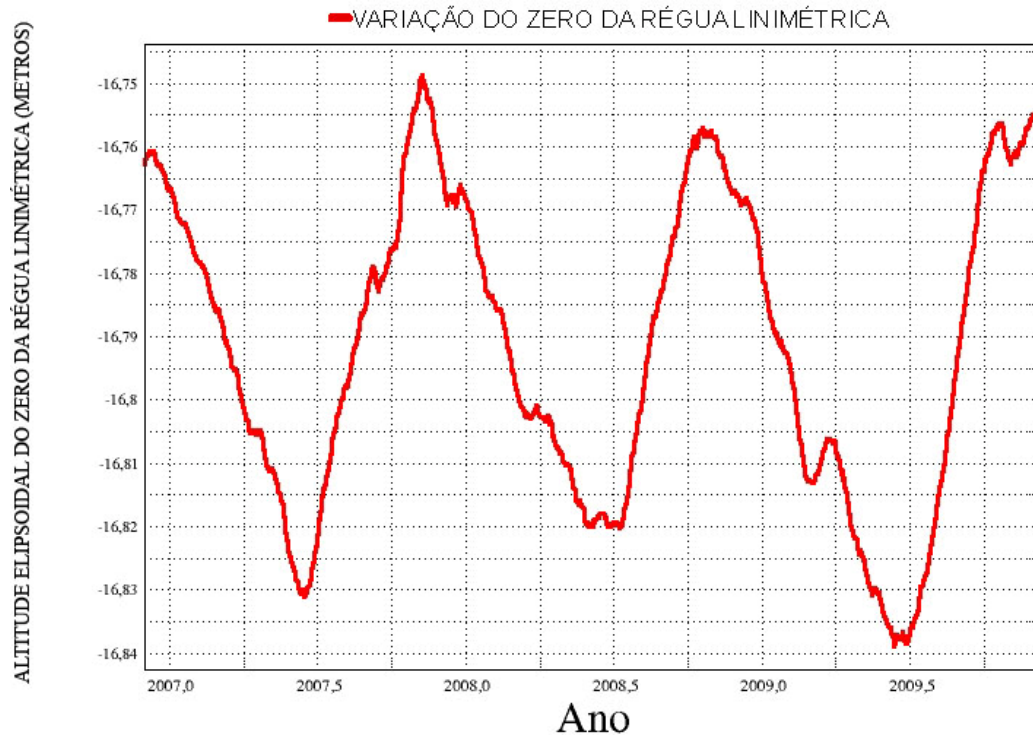
**Figura 7.17 – Estação de Santa Luzia na cheia de 2008**



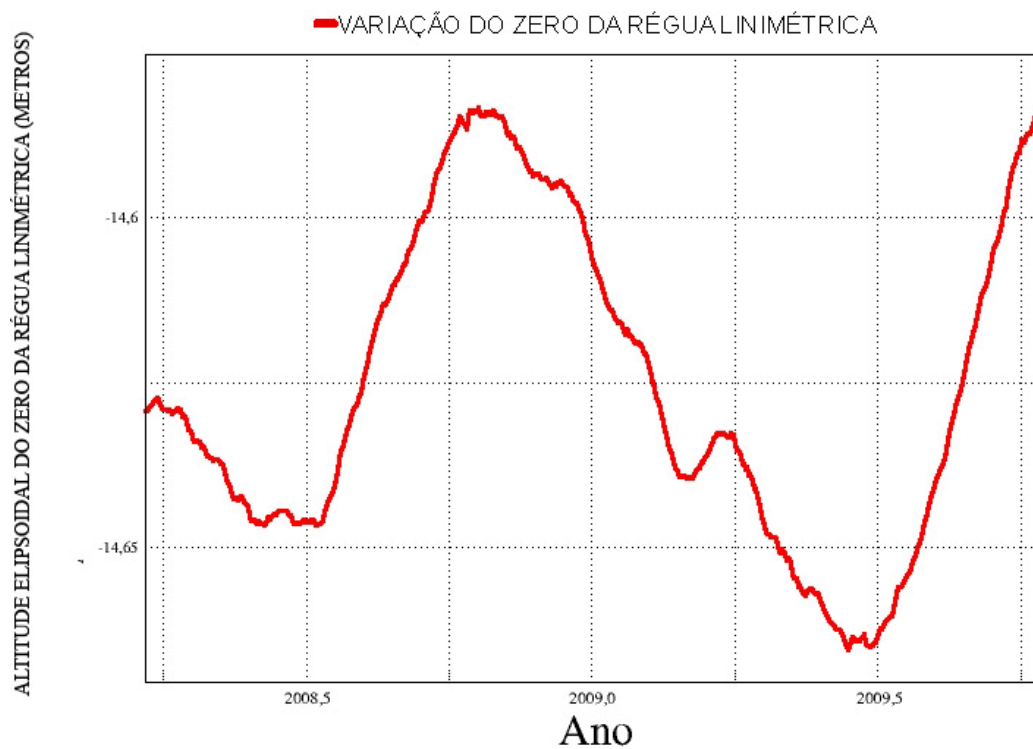
**Figura 7.18- Estação Santa Luzia na cheia em 2009**

As fotos acima (Figuras 7.16 a 7.18) mostram que as inundações afetaram as referências de nível existentes na estação de Santa Luzia, sendo que estas possivelmente foram deslocadas pelas fortes cheias. Contudo, apesar do local conter uma grande instabilidade, o ponto de Santa Luzia é fundamental para a análise da tecnologia de altimetria espacial, sendo necessário conviver com esse tipo de fenômeno e sendo feito um monitoramento contínuo de forma a modelá-lo. Para o caso de Santa Luzia, foi feita uma regressão linear e aplicada uma correção temporal ao nivelamento das estações.

Em seguida, são demonstrados os outros nivelamentos (Figuras 7.19 a 7.24), que não apresentaram deslocamentos significativos nas soluções de dupla diferença. Os nivelamentos foram feitos utilizando a estação de NAUS fixa e posteriormente aplicados à variação temporal da coordenada de NAUS (Figura 7.8), de forma a criar um nivelamento dinâmico para correções de leituras das réguas linimétricas de acordo com o efeito de carga.



**Figura 7.19 – Nivelamento da estação fluviométrica de Balbina (Eletronorte).**



**Figura 7.20- Nivelamento da estação fluviométrica de Porto União (CPRM).**

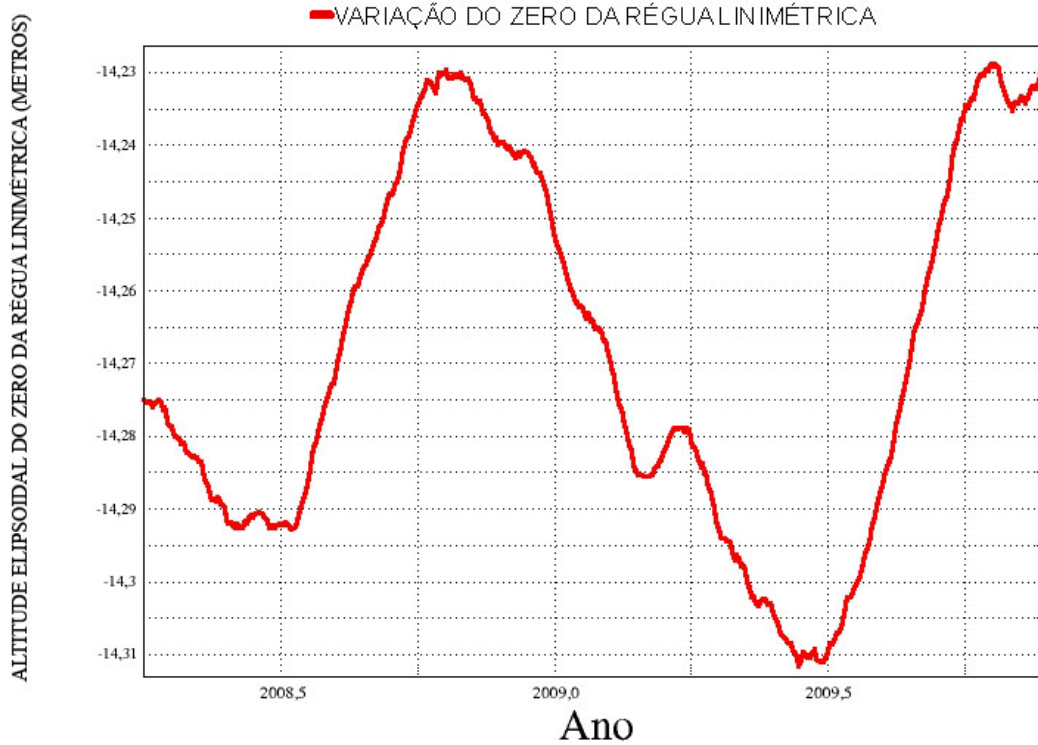


Figura 7.21- Nivelamento da estação fluviométrica de Urucurituba (CPRM).

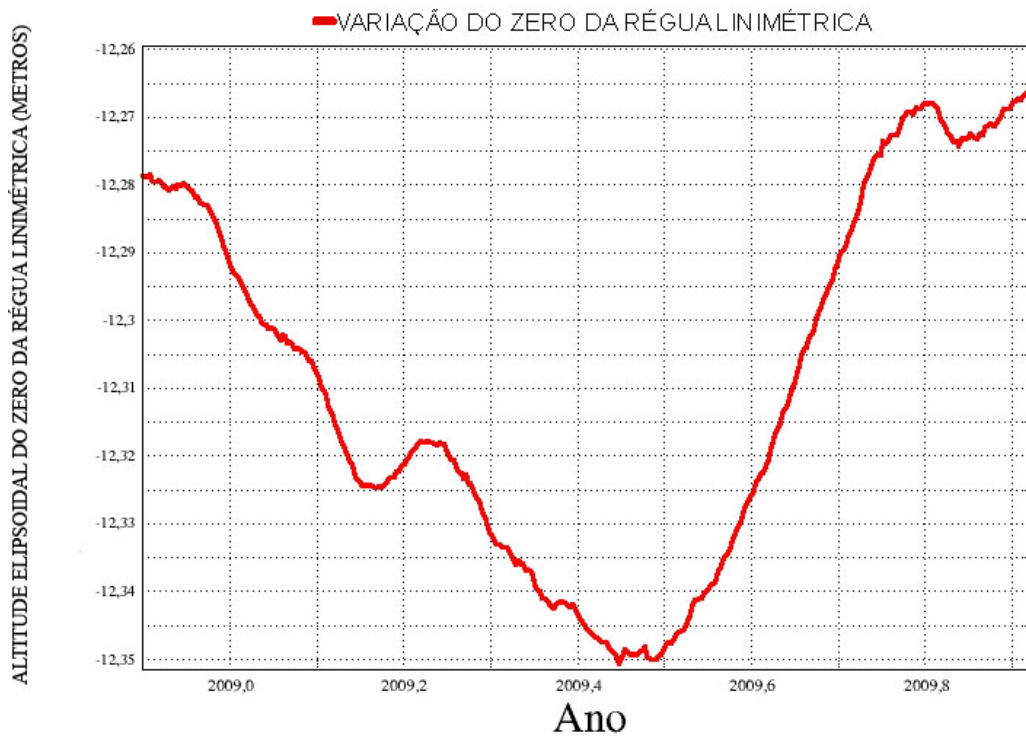


Figura 7.22- Nivelamento da estação fluviométrica de Iracema (CPRM).



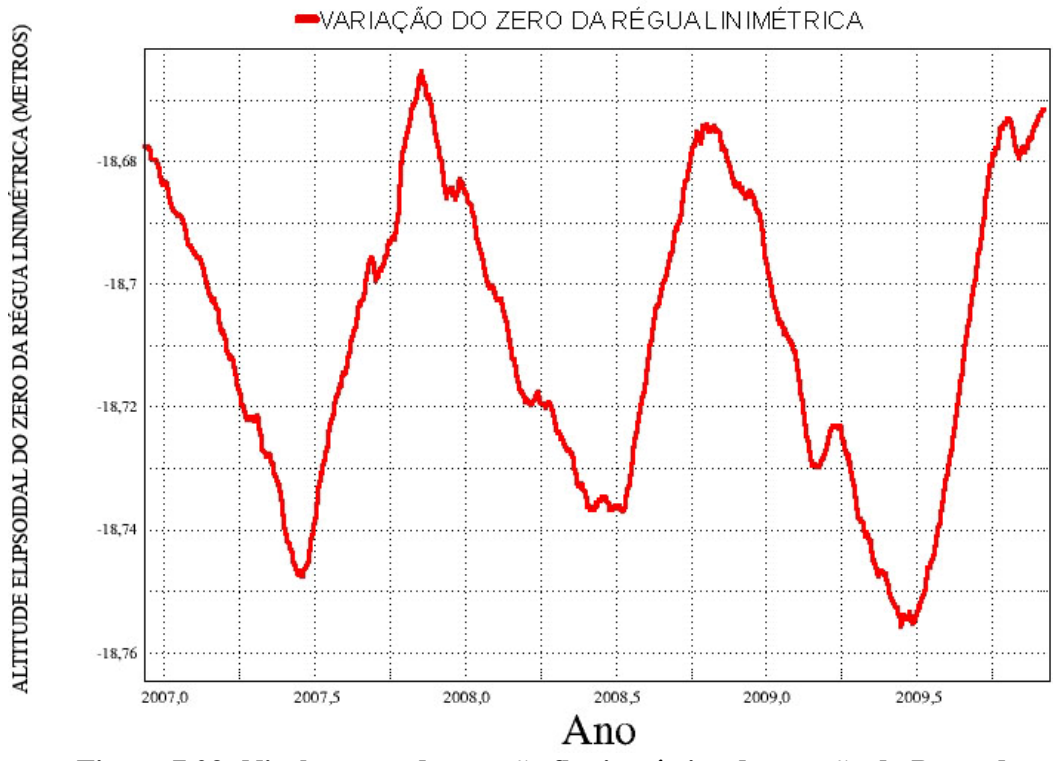


Figura 7.23- Nivelamento da estação fluviométrica da estação do Porto de Manaus (ANA).

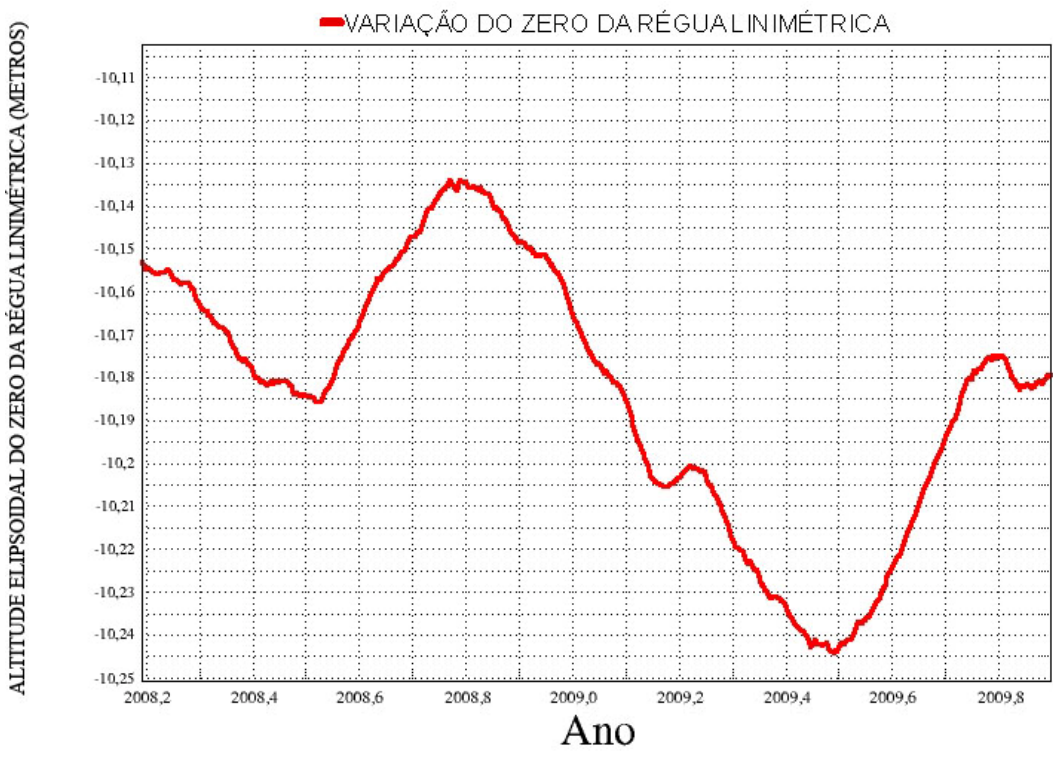


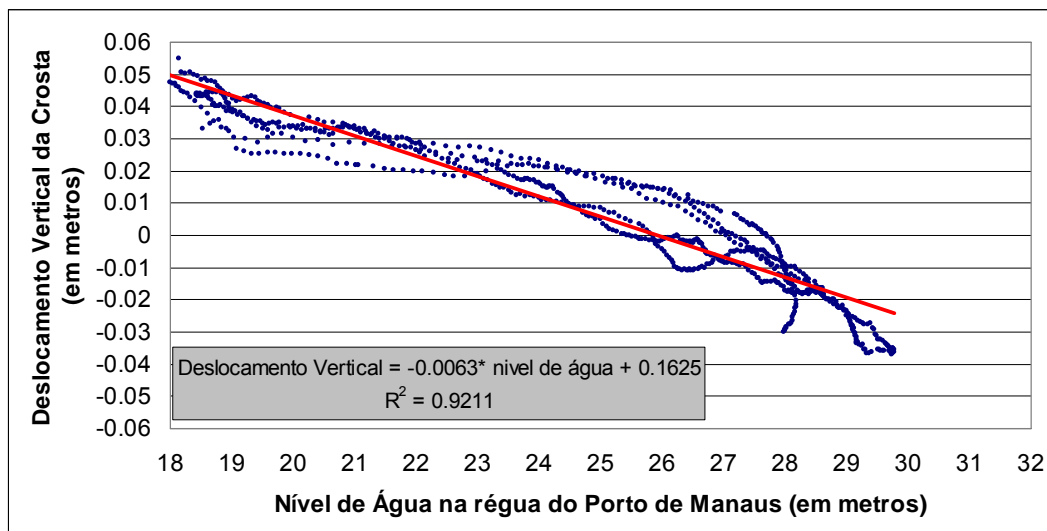
Figura 7.24- Nivelamento da estação fluviométrica de Santa Luzia (CPRM)

A estação de Santa Luzia teve correção linear ao longo do tempo de seu deslocamento, conforme anteriormente citado, na tentativa de correção da série de cotas de nível de água. Todas as variações altimétricas estão relacionadas ao zero da régua linimétrica de referência arbitrária, ou seja, os valores apresentados nos gráficos são os valores que devem ser subtraídos ou adicionados à cota zero da estação fluviométrica de forma que todas as estações estejam sob a mesma referência, no caso o ITRF2005 e o elipsóide GRS80.

### 7.2.1 Extrapolação de Valores de Nivelamento das Réguas

As séries das variações verticais dos nivelamentos das réguas foram obtidas para os períodos do presente estudo; entretanto, devido à forte correlação entre o deslocamento vertical das estações e o nível de água na estação fluviométrica do Porto de Manaus do rio Negro, tentou-se estabelecer uma equação que represente a variação da coordenada elipsoidal do zero da régua em função da variação do nível de água.

Foram selecionados os dados das soluções PPP e dados de nível de água na estação fluviométrica do Porto de Manaus. Esses dados foram selecionados em frequências diárias entre os anos de 2007 e 2009, totalizando mais de 700 medições entre o GPS e o nível de água, sendo realizada a regressão linear mostrada na Figura 7.25.



**Figura 7.25- Correlação entre o deslocamento vertical da crosta terrestre e o nível de água na estação de NAUS.**

A partir do gráfico da Figura 7.25, é possível estabelecer uma equação das alturas elipsoidais dos zeros das réguas em função do nível de água com sua variação no tempo, de forma a extrapolar os resultados para épocas de dados de nivelamento GPS não processados. A equação que define o zero da régua das estações estudadas, neste trabalho, é definida pela expressão

$$H(0,t) = A \cdot Na(t) + H_0$$

sendo os termos que compõe essa equação discriminados por:

**H(0,t)** - altura elipsoidal do zero da régua em metros da estação fluviométrica selecionada na época do tempo t;

**A** – coeficiente angular dado pela equação da Figura 7.25 de valor -0,0063;

**Na** - nível de água em Manaus no tempo t, segundo o banco de dados HIDROWEB (em centímetros);

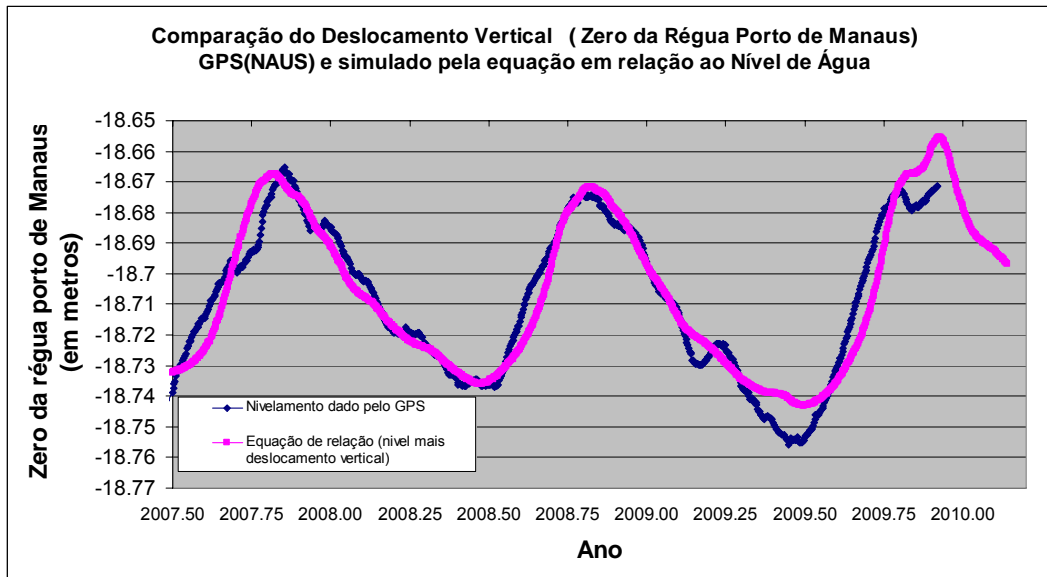
**H<sub>0</sub>** - nível base do zero da régua da estação a calcular (seus valores estão expressos na Tabela 7.1 e são uma relação dos nivelamentos por GPS das réguas com coordenada fixa da estação NAUS/RBMC de 93,89 metros somados a constante de 0,1625 metro dada pela equação da Figura 7.25).

**Tabela 7.1-Altura elipsoidal base (H<sub>0</sub>) do zero das réguas das estações da área de estudo.**

ESTAÇÃO	H <sub>0</sub>
PORTO DE MANAUS	-18.5555 metros
PORTO UNIÃO	-14.4655 metros
SANTA LUZIA	-10.0615 metros
URUCURITUBA	-14.1115 metros
IRACEMA	-12.1505 metros
BALBINA	-16.6385 metros

Como demonstração da equação acima, calculou-se a altura elipsoidal do zero da régua ao longo do tempo para a estação fluviométrica do porto de Manaus, utilizando as informações de nível de água obtidas no sítio do HIDROWEB/ANA, conforme ilustrado na Figura 7.26. Os resultados dos valores da equação foram comparados com os resultados obtidos pelo nivelamento por receptor GPS obtido na Figura 7.23.





**Figura 7.26- Simulação de deslocamento vertical dos zeros das réguas gerado pela equação de relação entre nível de água e deslocamento vertical.**

A equação apresentou um índice satisfatório de erro médio quadrático de 0,92, fator que comprova a correlação entre os dados GPS e dados de nível. No entanto, essa relação pode ser melhorada considerando as seguintes questões:

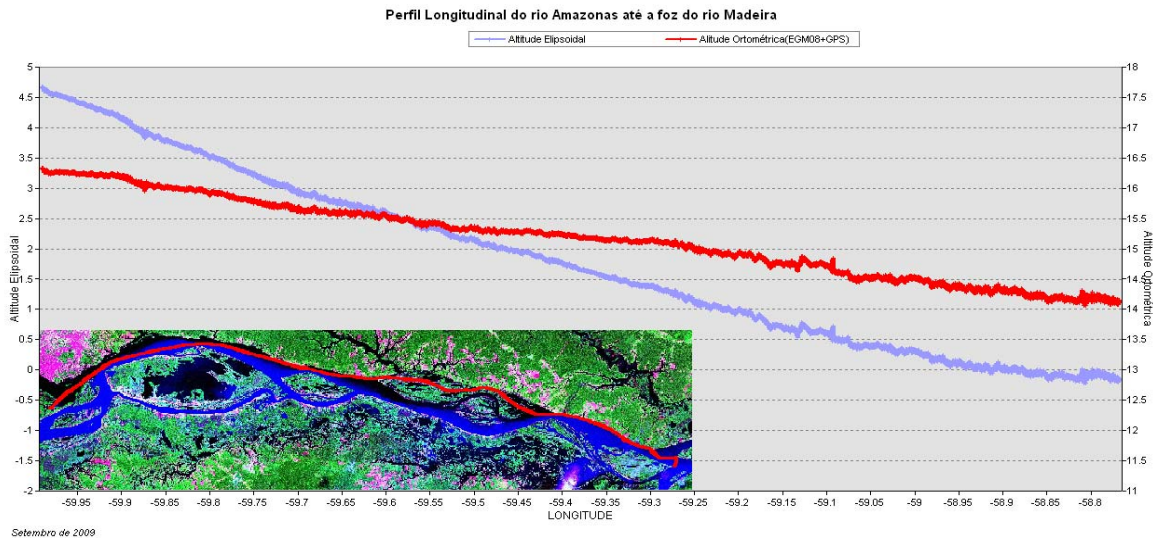
- consideração de um ponto mais favorável do que a régua do Porto de Manaus para a comparação com dados GPS, devido a região de Manaus sofrer efeitos de remanso hidráulico, o que altera a declividade de níveis do rio Negro;
- separação dos períodos de subida e de descida do nível de água; os mesmos são afetados por diferentes velocidades, fato importante a se considerar, pois o deslocamento vertical causado pelas variações de massa na bacia e diferentes velocidades geram diferentes variações de massa para o mesmo nível;
- consideração de efeitos atmosféricos como termo variável da equação, podendo-se usar dados da estação meteorológica de Manaus, disponível pelo INMET ([www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br))

## 7.2 Resultados dos Processamentos Cinemáticos e Aplicações do Modelo de Geóide

Os resultados obtidos dos levantamentos por receptores GPS em modo cinemático, utilizando receptores sobre barco e prancha flutuantes, descritos no Capítulo 6, visam a descrever:

- principalmente, a declividade elipsoidal ao longo da faixa de coleta de dados dos satélites altímetros e a distância dos pontos dos dados de altimetria espacial para a estação fluviométrica próxima a linha de passagem do satélite, de forma a que possa ser feita uma comparação mais precisa entre os dados de altimetria espacial e dados fluviométricos;
- características hidrodinâmicas dos corpos de água observados, de modo que, para atingir esse objetivo, foi feita a comparação entre a altitude elipsoidal dada pelo GPS e a altitude ortométrica dada pelo GPS subtraída da ondulação geoidal dada pelo modelo EGM08, de forma a avaliar o desempenho do modelo de geóide.

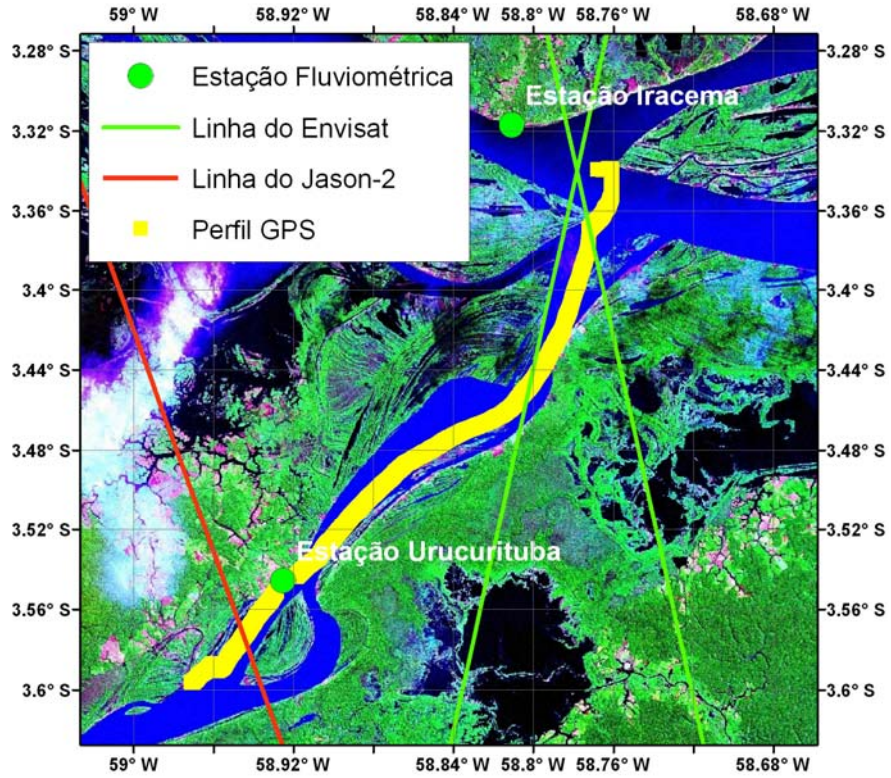
Como primeiro resultado, foi realizada uma tentativa de avaliar preliminarmente a qualidade do modelo de geóide EGM08. Nesse sentido, foram obtidos dois (2) perfis, sendo o primeiro deles na direção preferencial leste-oeste (rio Amazonas) e outro na direção preferencial norte e sul de (rio Madeira) de forma a avaliar a correção do modelo de geóide em diferentes direções. A seguir, segue a Figura 7.27, que descreve a declividade de um trecho do rio Amazonas, realizado durante a campanha de campo de setembro de 2009.



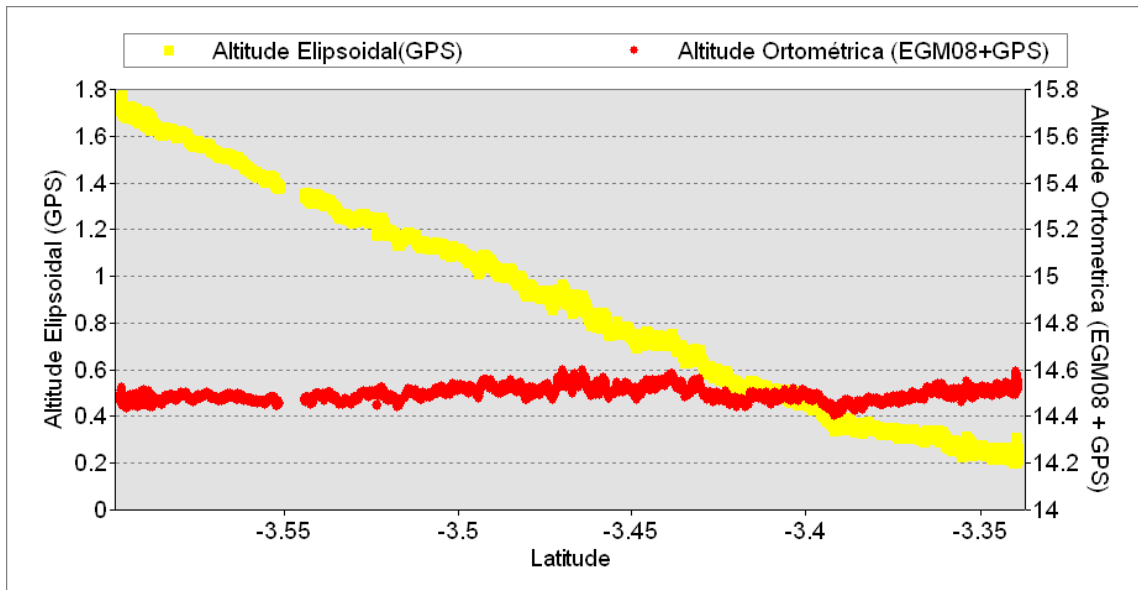
**Figura 7.27 – Gráfico do perfil longitudinal do rio Amazonas em altitudes elipsoidais (roxo e escala à esquerda) e ortométricas (vermelho e escala à direita).**

A declividade elipsoidal de aproximadamente cinco (5) metros nos 125 quilômetros do trecho reflete aproximadamente uma declividade de quatro centímetros por quilômetro (4cm/km). Com a aplicação de modelo de geóide, esse valor reduz-se e obtém-se uma declividade de 2,5 metros no mesmo trecho refletindo uma declividade aproximada de dois centímetros por quilômetro (2cm/km). Confirma-se que a declividade obtida pela altitude ortométrica está mais de acordo com a informação de conhecimento comum sobre a baixa declividade do rio Amazonas, que oscila em torno de 2 cm a 1 cm por cada quilômetro percorrido.

Na Figura 7.28, descreve-se o perfil cinemático do rio Madeira e sua confluência com o rio Amazonas, enquanto, na Figura 7.29, apresenta-se sua representação gráfica.



**Figura 7.28- Percurso GPS cinemático no rio Madeira e em sua confluência com o Amazonas.**



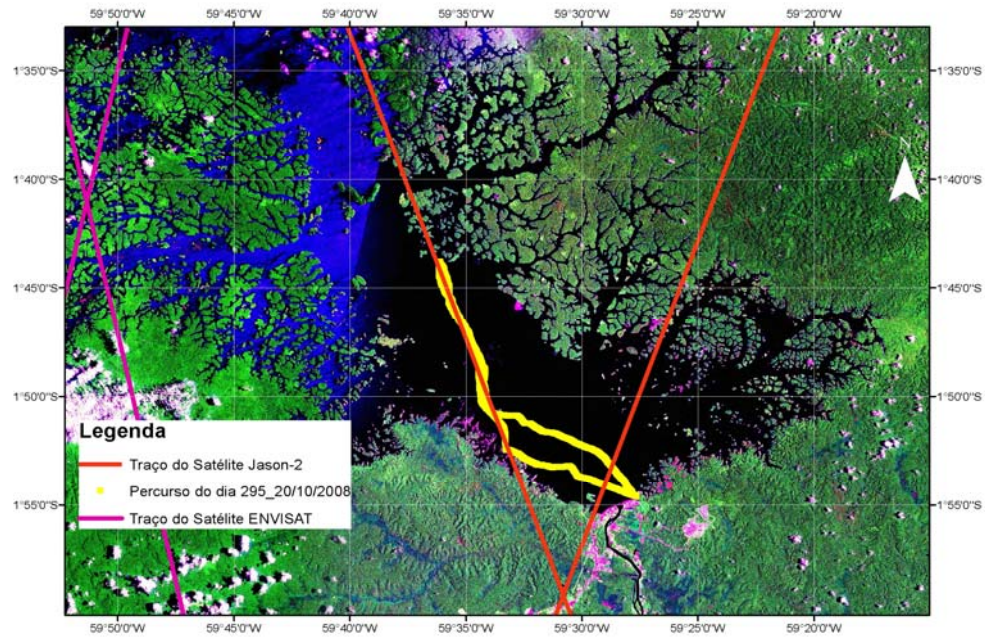
**Figura 7.29- Gráfico do Perfil do rio Madeira e sua confluência com rio Amazonas.**

A área descrita na Figura 7.28, que abrange o rio Madeira próximo a sua foz, sofre com o fenômeno de remanso hidráulico anteriormente descrito por STRASSER (2008), provocado pela força das águas do rio Amazonas e que tem seus efeitos sentidos até 400 quilômetros a montante no rio Madeira. O efeito de remanso hidráulico provoca uma barragem natural na foz do rio Madeira, gerando, como uma de suas conseqüências, a diminuição da declividade natural de linha de água, tornando-a praticamente nula na região de obtenção do perfil apresentado na Figura 7.29. Esse efeito pode ser observado no gráfico da Figura 7.29, onde uma declividade elipsoidal da ordem de 1,7 metros em uma área de apenas dez (10) quilômetros é sensivelmente reduzida para poucos centímetros através da aplicação da ondulação geoidal fornecida pelo modelo EGM08.

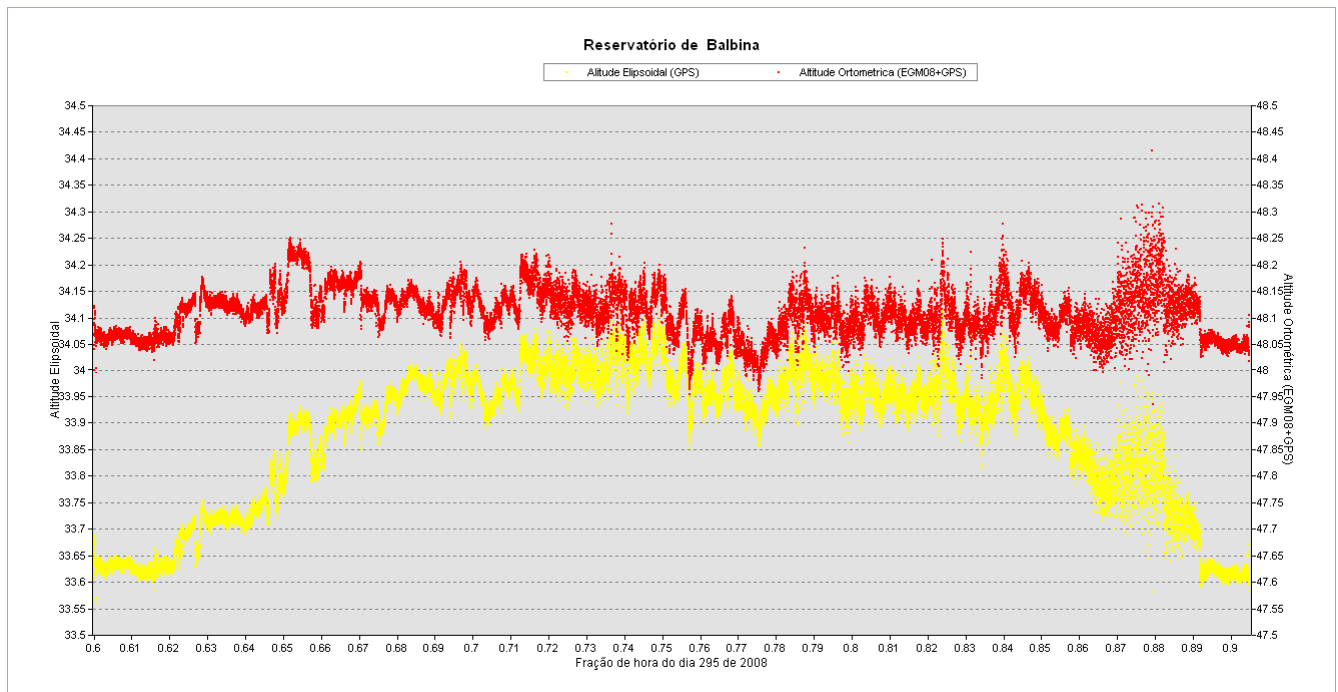
Os dois resultados da redução da altitude elipsoidal, obtida por GPS, para ortométrica, através da aplicação do modelo de geóide EGM08, tanto para o rio Amazonas quanto para o rio Madeira, reflete satisfatoriamente as características hidrodinâmicas dos dois trechos observados, fato que leva a considerar bons resultados do modelo de geóide para a área de estudo. Entretanto, novos exemplos da correção de geóide serão mostrados a seguir de forma a se obter informações mais conclusivas.

### **7.3.1 Reservatório de Balbina**

O mesmo caso da foz do rio Madeira ocorre na região do lago do reservatório de Balbina, mostrado na Figura 7.30, que, no caso, também se comporta como uma região equipotencial. Na Figura 7.30, é descrito o percurso do levantamento GPS executado sobre o lago na campanha de campo realizada em outubro de 2008. Na Figura 7.31, são ilustradas graficamente a variação da altitude elipsoidal dada pelo GPS e a altitude ortométrica utilizando as medições GPS aplicadas à ondulação do geóide fornecida pelo modelo EGM08.



**Figura 7.30- Percurso executado com GPS cinemático no reservatório de Balbina.**



**Figura 7.31- Gráfico do perfil do lago de Balbina em altitudes ortométrica e elipsoidal.**

O modelo EGM08 também apresenta correção consistente com as características hidrodinâmicas de uma região equipotencial como é o caso de um lago.



As pequenas variações resultantes não podem corretamente ser interpretadas, podendo ser falta de resolução do modelo de geóide, falhas no processamento devido ao multicaminho ocasionado pelos diversos troncos de árvores que se encontram no meio do lago, como mostra a Figura 7.32. Esses erros podem ser ocasionados também por movimentos da prancha GPS, que utiliza apenas um receptor GPS.

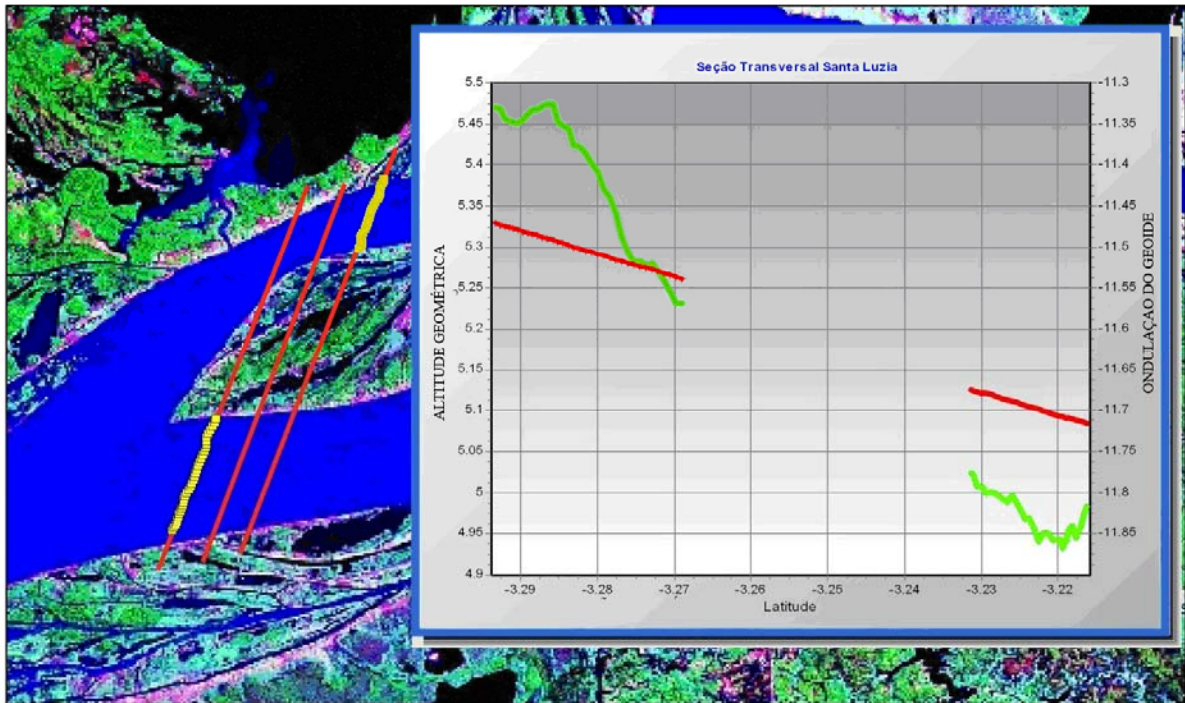


**Figura 7.32- Lago de Balbina e os diversos troncos de árvores, o que dificultou o levantamento e o processamento de dados GPS obtidos pela prancha flutuante.**

Na análise da declividade da linha de água, o ponto onde está alocada a régua da barragem, analisando sua altura elipsoidal, está em torno de 30 centímetros mais baixo que o início da linha de aquisição de dados do satélite Jason-2. Ao longo da linha de passagem do satélite Jason-2, a declividade elipsoidal é menor em torno de 5 centímetros, somando, no total, uma correção máxima de 35 centímetros quando forem comparados os dados fluviométricos obtidos da régua nivelada. A utilização do modelo geóide, no entanto, corrige a maioria dos efeitos provocados pela variação de declividade no reservatório de Balbina.

### 7.3.2 Santa Luzia

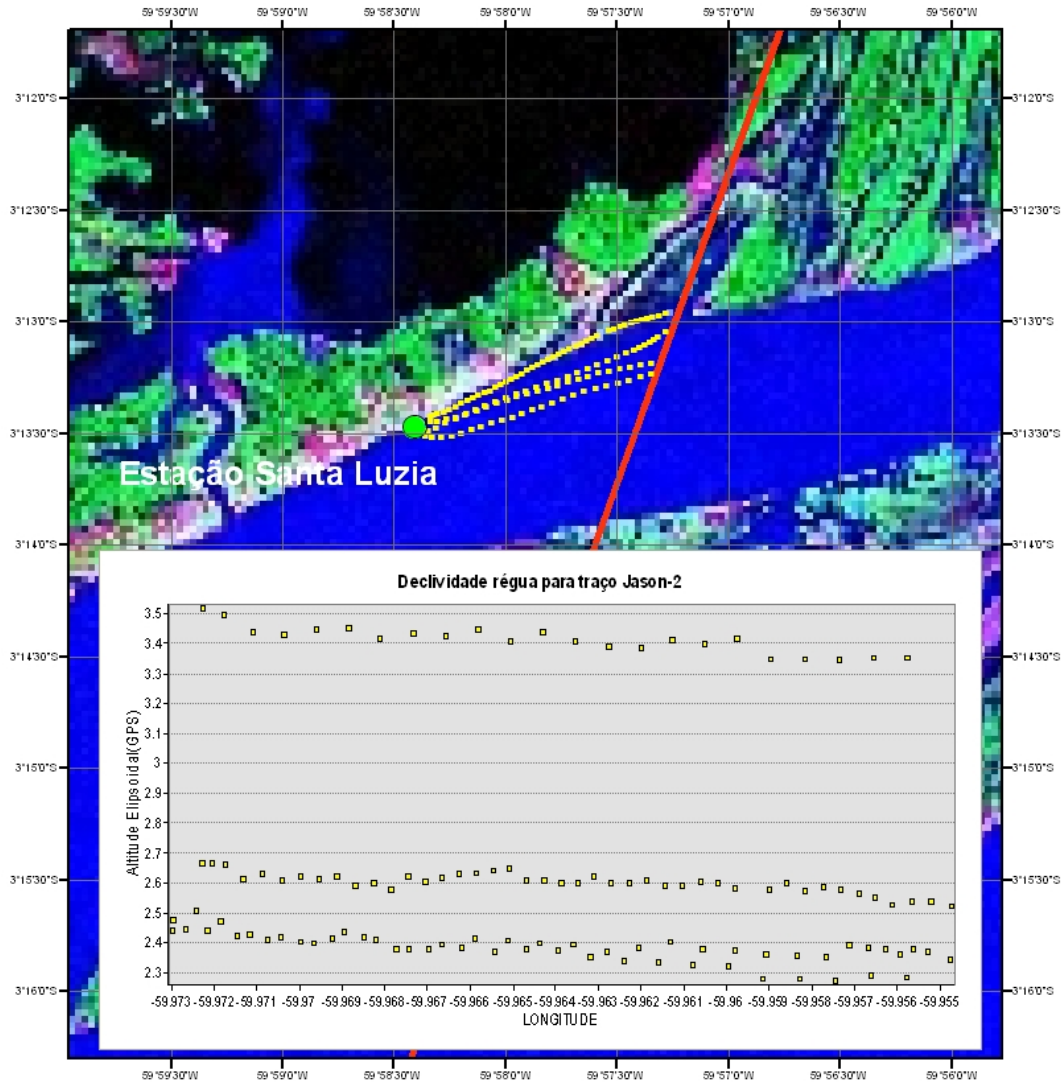
Para a estação de Santa Luzia no rio Solimões, foi executado o mesmo procedimento, sendo analisadas as declividades da linha de água nos locais de aquisição de dados do satélite altímetro Jason-2 e a declividade encontrada entre os pontos de aquisição e a estação fluviométrica. A Figura 7.33 mostra as linhas de passagem e sua declividade elipsoidal e ondulação do geóide observada durante o trecho.



**Figura 7.33 – Declividade de Santa Luzia ao longo da linha do Jason-2**

As declividades ao longo da linha do Jason-2 (em verde na Figura 7.33) chegam a 50 centímetros, enquanto a ondulação geoidal (em vermelho na Figura 7.33) apresenta apenas uma correção de apenas de 20 cm. A seguir, na Figura 7.34, é evidenciada a variação de declividade entre a linha mais a jusante, descrita na Figura 7.33, e a estação fluviométrica.





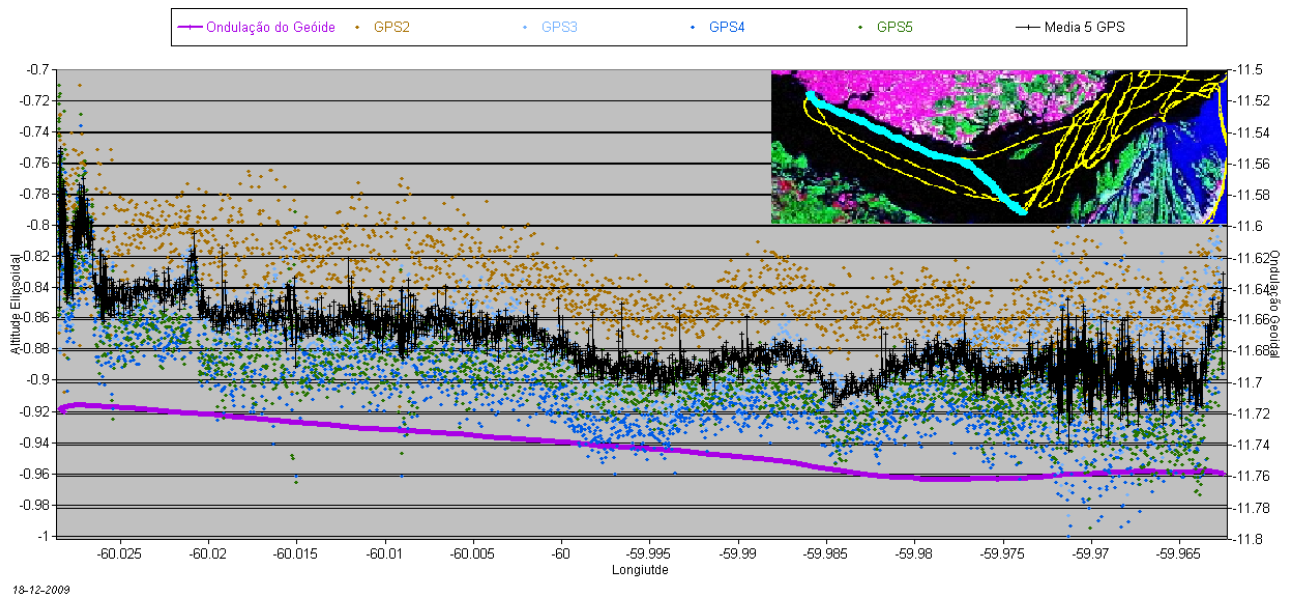
**Figura 7.34- Declividade da estação de Santa Luzia para o início do traço do satélite Jason-2**

A declividade da estação de Santa Luzia até o traço do Jason-2 foi medida ao longo de dois (2) trajetos de ida e volta, juntando-se quatro (4) séries de dados. A declividade do traço para a estação está em torno de 15 centímetros com a correção de ondulação geoidal, enquanto a declividade está em torno de sete (7) centímetros.

Em Santa Luzia o geóide reduz a declividade apenas parcialmente, contudo, devido ao fluxo do rio Solimões e da ilha encontrada entre as regiões de medição, não se pode saber se a fonte corresponde a erros de geóide ou a efeitos hidrodinâmicos.

### 7.3.3 Manaus

A estação do Porto de Manaus fica há cerca de dez (10) quilômetros para as linhas de passagem do satélite do Jason-2, sendo a maior distância observada, neste trabalho, de uma estação *in situ* para a linha de aquisição de dados do satélite altímetro. Na Figura 7.35, segue o gráfico da declividade realizada durante a campanha de dezembro de 2010 no período de seca, entre a estação de Manaus e as linhas de passagem do Jason-2.



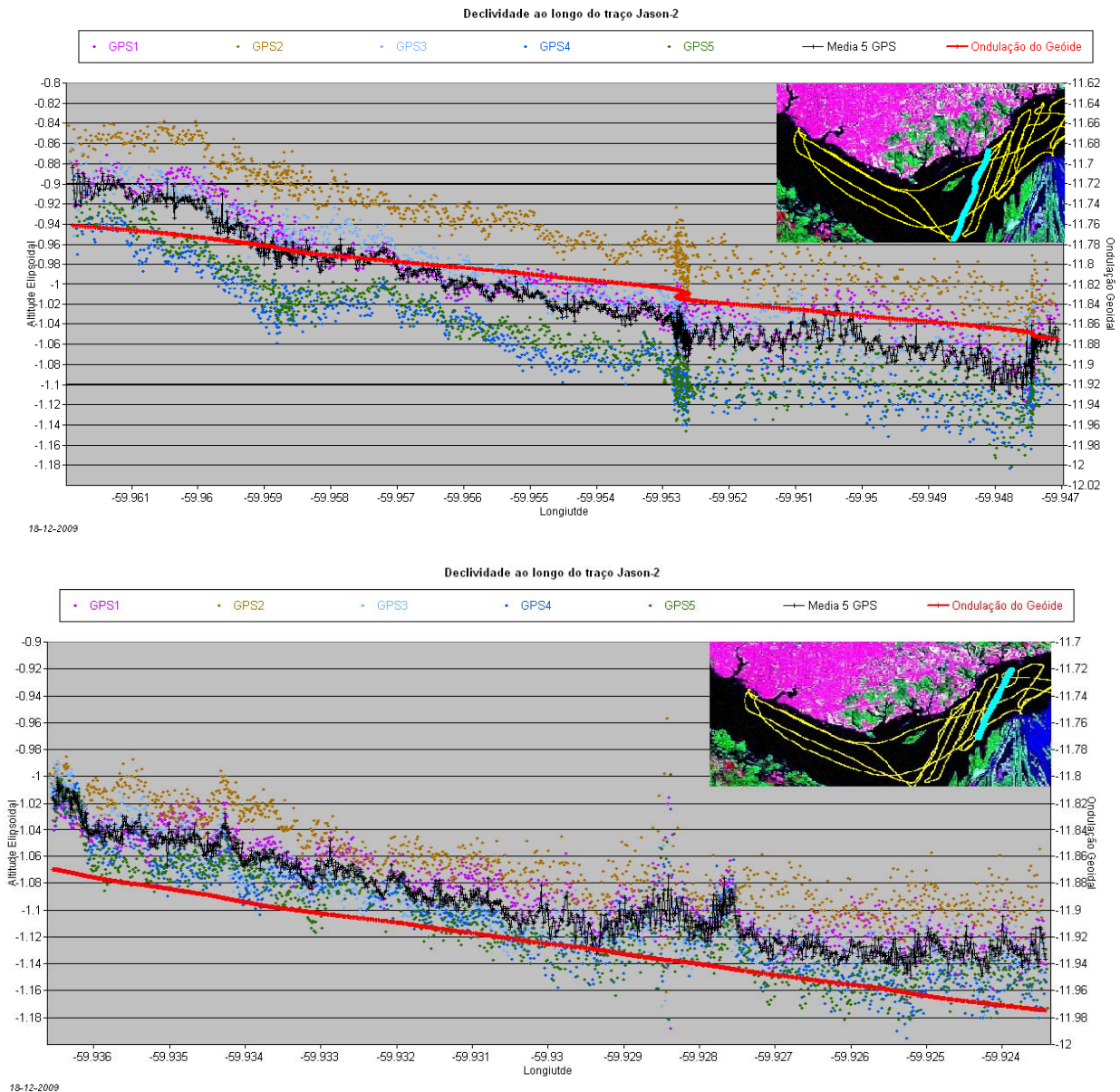
**Figura 7.35- Declividade da estação até a linha de passagem do Jason-2.**

O gráfico da Figura 7.35 foi executado a partir de dados de cinco (5) receptores GPS instalados sobre o barco. Conforme citado anteriormente, devido a efeitos de velocidade, foram encontradas grande variação entre os aparelhos GPS instalados ao fundo do barco e na frente, sendo que os dois (2) receptores GPS do meio se comportaram muito mais próximos à média dos cinco (5) receptores GPS instalados no barco.

Quanto à declividade da estação linimétrica para o local de aquisição de dados do Jason-2, foi encontrada baixa declividade elipsoidal, sendo que a ondulação geoidal atenuou a declividade encontrada. Entre a estação e a linha de passagem do Jason-2, foi encontrada aproximadamente seis (6) centímetros de declividade elipsoidal. Com a redução para altitudes ortométricas, a partir do modelo EGM08, reduz-se a declividade para em torno de quatro (4) centímetros, fazendo com que a declividade diminua para

dois (2) centímetros em 10 quilômetros, estando de acordo com o forte efeito conhecido na região de remanso hidráulico causado na foz do rio Negro e provocado pelas águas do rio Solimões.

Os gráficos na Figura 7.36 resumem as declividades ao longo das linhas de passagem.



**Figura 7.36- Declividade ao longo das linhas de passagem do satélite Jason-2.**

A declividade elipsoidal ao longo das linhas de passagem do satélite Jason-2 é um pouco mais acentuada do que a declividade da estação até a linha de passagem do satélite, sendo considerado o valor em torno de doze (12) centímetros de declividade

elipsoidal. Mas ambos os gráficos demonstram a boa correlação entre os valores de declividade elipsoidal e de declividade do geóide dados pela ondulação geoidal.

### 7.3.4 Iracema

Na estação de Iracema, os levantamentos foram executados por receptores GPS próximos a linha de passagem do satélite Envisat. Os resultados da campanha de dezembro de 2009 foram obtidos conforme ilustra a Figura 7.37.

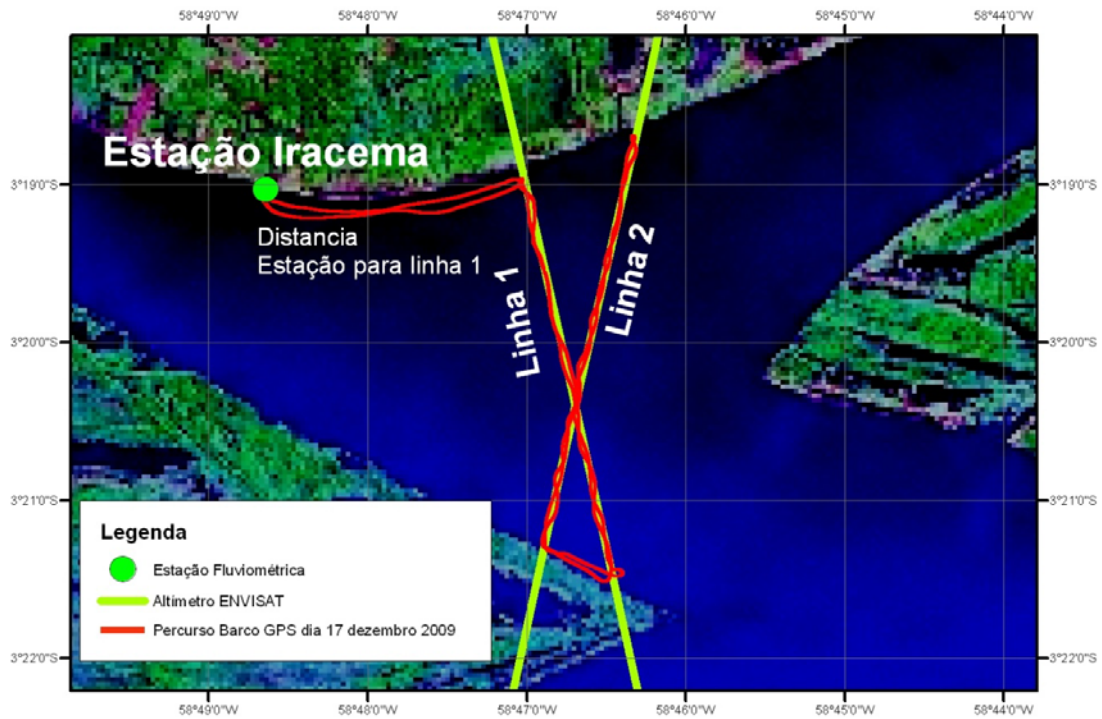
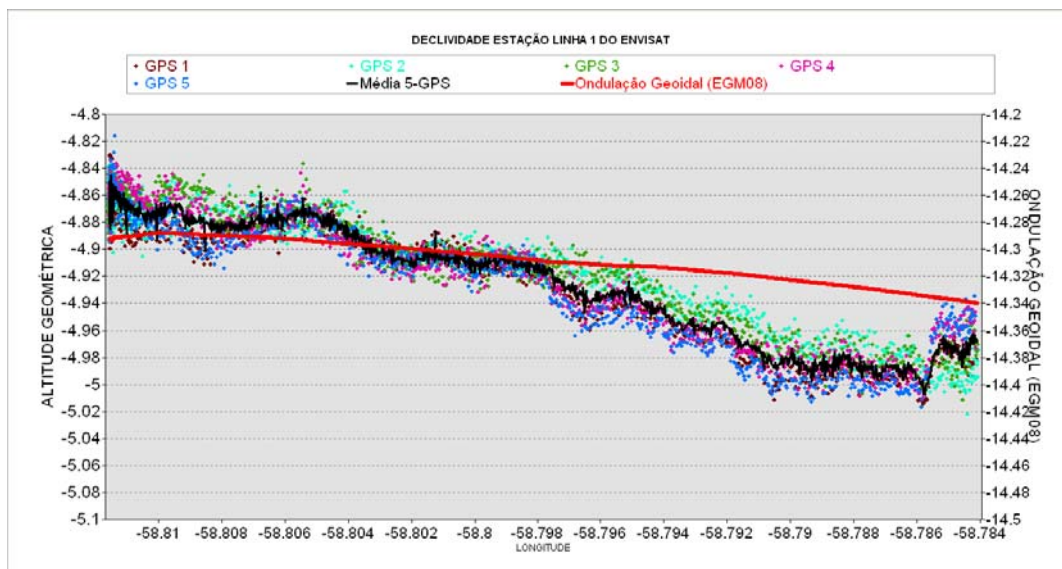


Figura 7.37 – Procedimento de levantamento da declividade da linha de água.

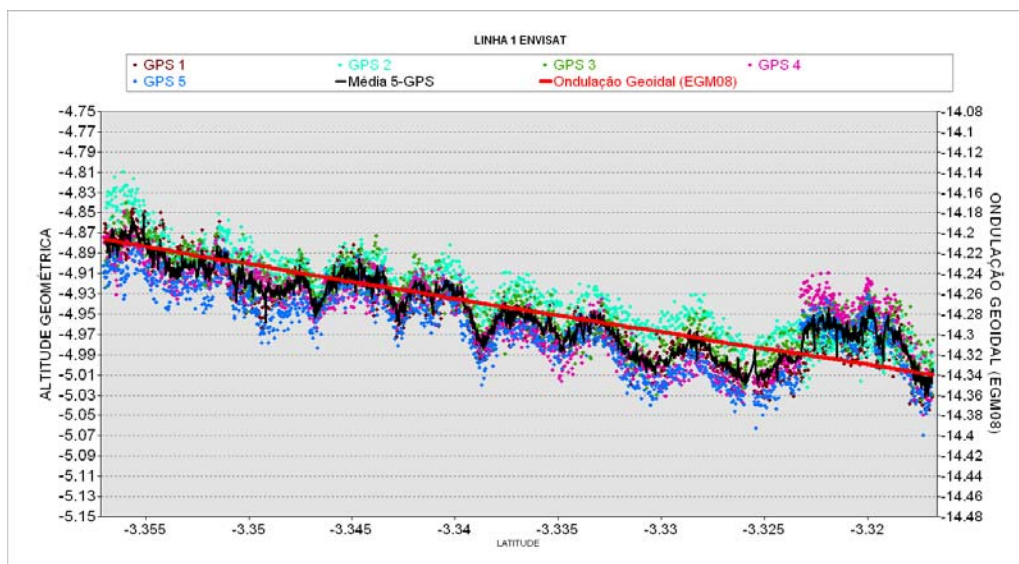




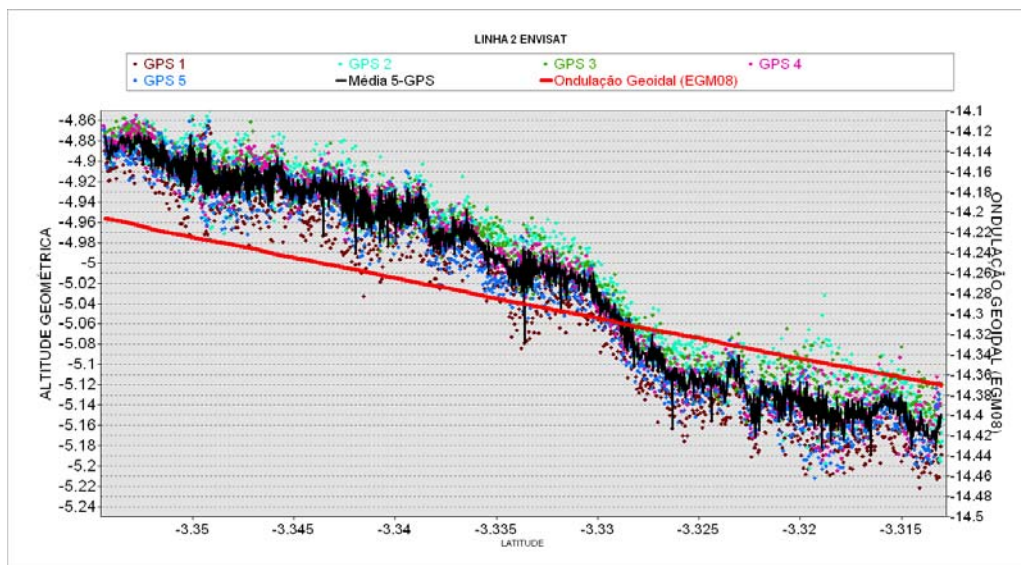
**Figura 7.38- Declividade da linha de água da estação fluviométrica de Iracema e linha 1 de passagem do satélite Jason-2.**

A declividade elipsoidal apresentada na Figura 7.38 apresenta valores da ordem de doze (12) centímetros. Com a utilização da ondulação geoidal, os valores encontram-se em torno de oito (8) centímetros, contudo a parte mais a montante do trecho apresenta uma declividade diferente da parte a jusante, fato que pode ser observado no gráfico acima. Por hipótese, esses valores podem refletir características hidrodinâmicas causadas por influência do rio Madeira

Os gráficos das Figuras 7.39 e 7.40 mostram a declividade ao longo das duas linhas de passagem do satélite Envisat.



**Figura 7.39- Declividade da linha 1 do satélite Jason-2.**



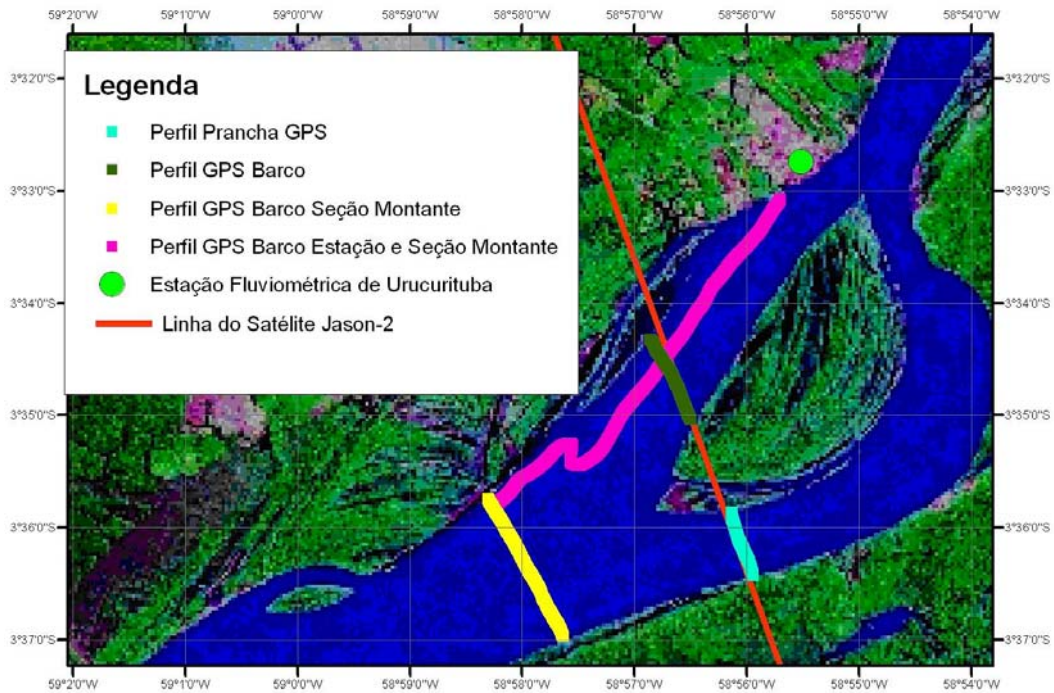
**Figura 7.40- Declividade da linha de água na linha 2 de passagem do satélite Jason-2.**

A linha um (1), na Figura 7.39, possuiu uma boa correlação com o modelo de geóide EMG08, tendo uma variação de declividade elipsoidal da linha de água em torno de doze (12) centímetros aproximadamente, sendo linearmente atenuada pelo modelo na obtenção da declividade ortométrica.

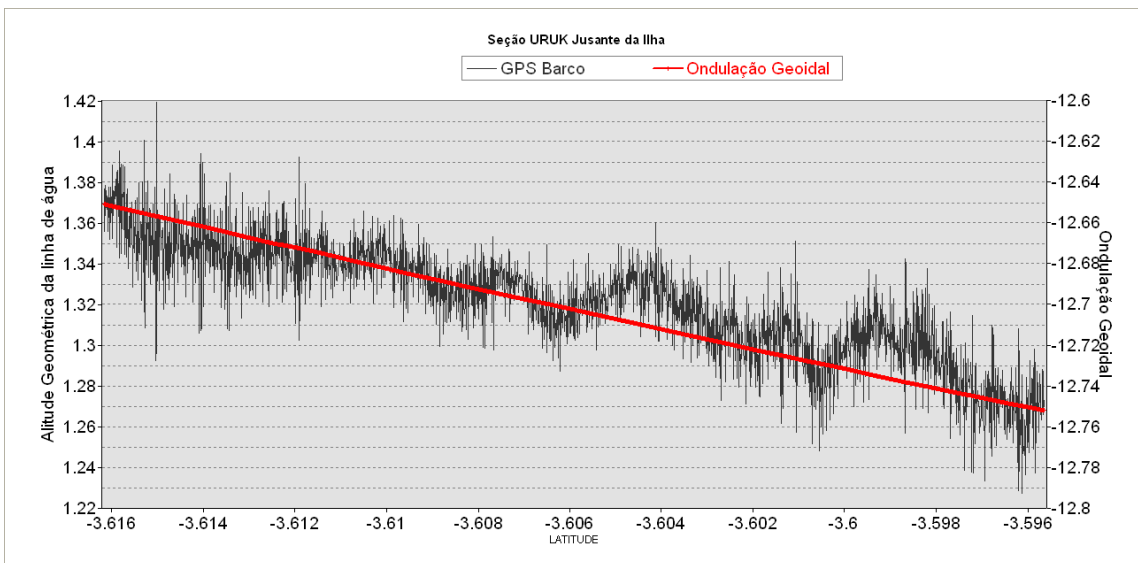
A linha dois (2), na Figura 7.40, apresenta valores bem diferentes em relação a linha um (1), certamente influenciados pelo azimute oposto à direção da linha 1, como pode ser visto na Figura 7.38. O fato também pode ser explicado por uma variação mais acentuada na parte norte do gráfico devido à maior proximidade da influência do rio Madeira.

### 7.3.5 Urucurituba

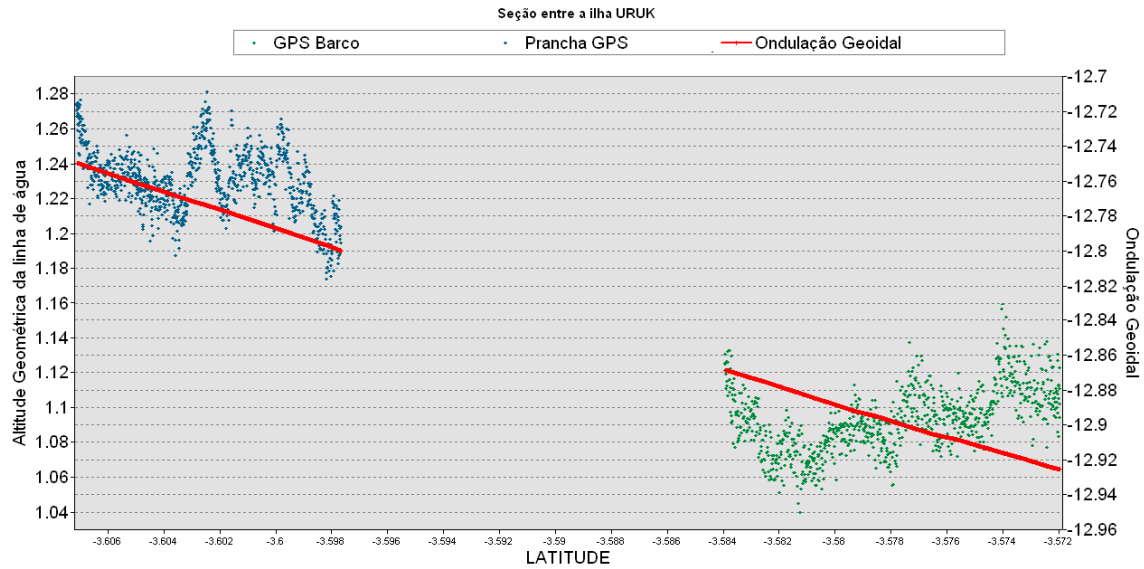
Na estação de Urucurituba, foi realizado, durante a campanha de setembro de 2009, o seguinte percurso descrito na Figura 7.41, de forma a descrever a declividade dos locais de passagem do satélite Jason-2. Os resultados estão mostrados nas Figuras 7.42 e 7.43, enquanto a declividade entre a seção montante e a estação fluviométrica está ilustrada na Figura 7.41.



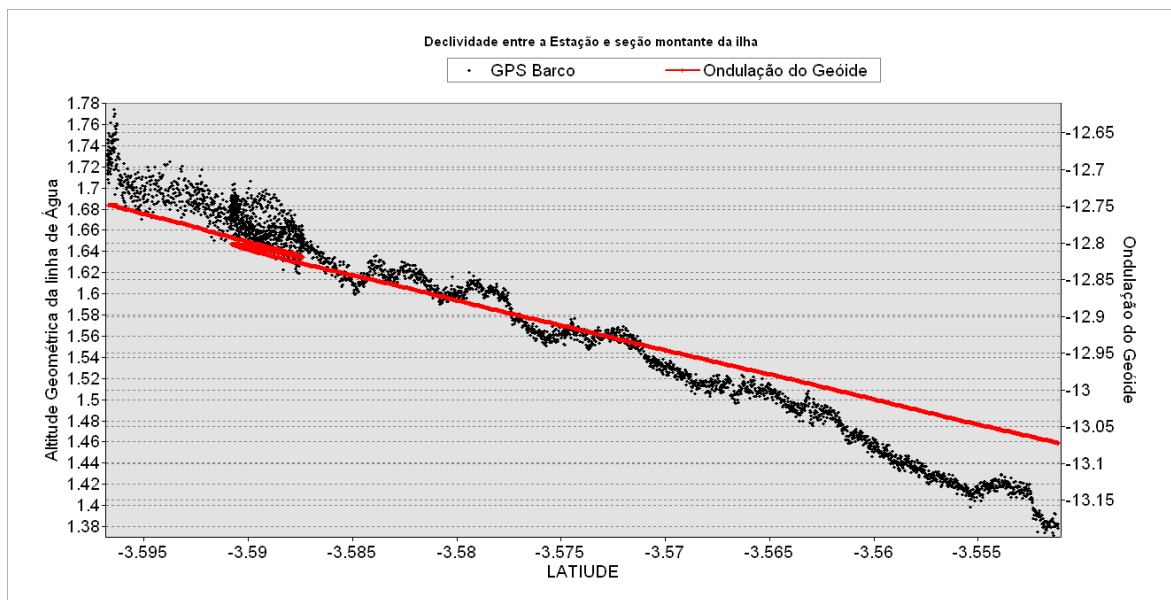
**Figura 7.41- Percurso executado pelo barco e prancha GPS na estação de Urucurituba**



**Figura 7.42- Variação da altura da linha de água na seção montante da ilha realizado pelo GPS no barco.**



**Figura 7.43- Variação da linha de água nas seções entre a ilha de Urucurituba , realizadas pela prancha GPS e pelo barco com GPS acoplado.**



**Figura 7.44- Variação da linha de água entre a estação fluviométrica e a seção a montante da ilha.**

Os resultados das Figuras 7.42 a 7.44 ressaltam novamente a boa correlação entre os dados com o modelo de geóide, sendo encontradas baixas declividades elipsoidais no trecho que podem ser reduzidas aplicando-se o modelo de geóide.



## **7.4 Outros resultados**

No presente trabalho, foram desenvolvidos uma grande quantidade de resultados, principalmente para os dados de receptores GPS em modo cinemático, sendo impraticável apresentar todo o conteúdo devido a milhares de processamentos realizados. Esses processamentos envolveram, dados de nove (9) campanhas, estimando-se mais de 70 dias de medições com vários receptores GPS, processamento de mais de 10 mil dias de estações permanentes nos modos dupla diferença e PPP. Baseado nesse critério, os resultados descritos, neste trabalho, expressam uma parte dos resultados, contudo sem perder o contexto metodológico evidenciando todas as informações importantes e todos os processos e variações significativas. Para maiores informações, pode-se consultar os órgãos citados no início do Capítulo 7. Os itens a seguir descrevem algumas das importantes informações que podem ser recuperadas ou reproduzidas no âmbito da hidrologia a partir do uso de receptores GPS.

### **7.4.1 Importância do Nivelamento das Réguas (Porto União)**

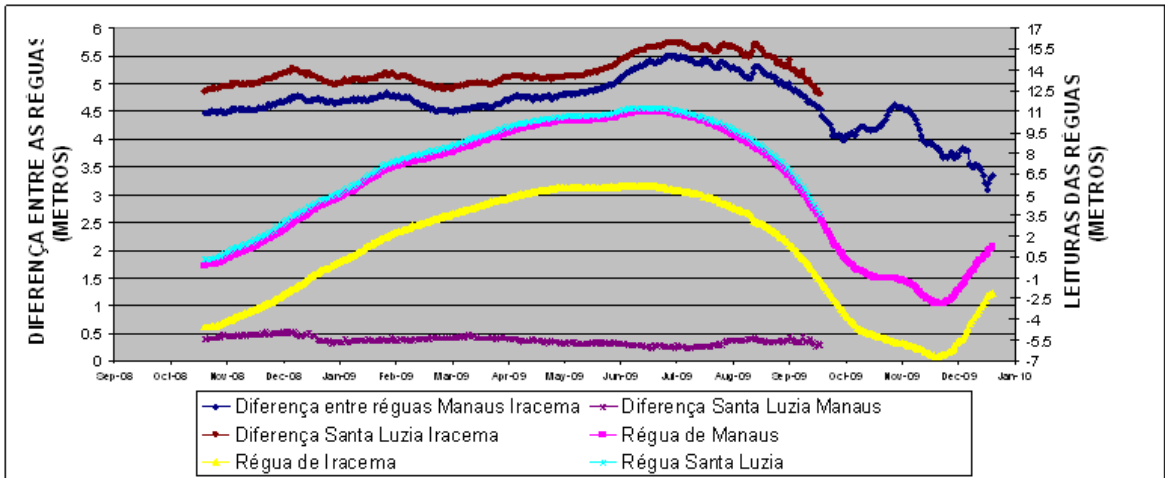
A estação de Porto União teve sua operação descontinuada devido a um forte movimento de massa que atingiu a estação, destruindo réguas e referências de nível. A partir do nivelamento GPS executado e demonstrado anteriormente, a série pode ser reconstruída, caso este seja de interesse do grupo de pesquisa de altimetria espacial, fato que destaca a importância do nivelamento das estações fluviométricas por receptores GPS. Somente com o uso de referenciais comuns às estações hidrológicas, está garantida, de forma segura, a preservação de séries hidrológicas. Caso como este que ocorreu em Porto União, em que houve o afogamento e a danificação da seção de réguas, podem ser ainda mais graves em estações como, por exemplo, do Porto de Manaus, de mais de 100 anos de registros de nível de água. Apesar do Brasil ser uma região de maior estabilidade, sem grandes catástrofes naturais, fenômenos extremos como cheias históricas, movimentos de massa e eventos sísmicos estes inclusive já sendo anteriormente registrados na Amazônia, podem ocasionar danos irreparáveis em estações fluviométricas, ocasionando a descontinuidade permanente de longas séries históricas de nível de água de valor inestimável.



**Figura 7.45- Movimento de massa que causou a desativação da estação fluviométrica Porto União.**

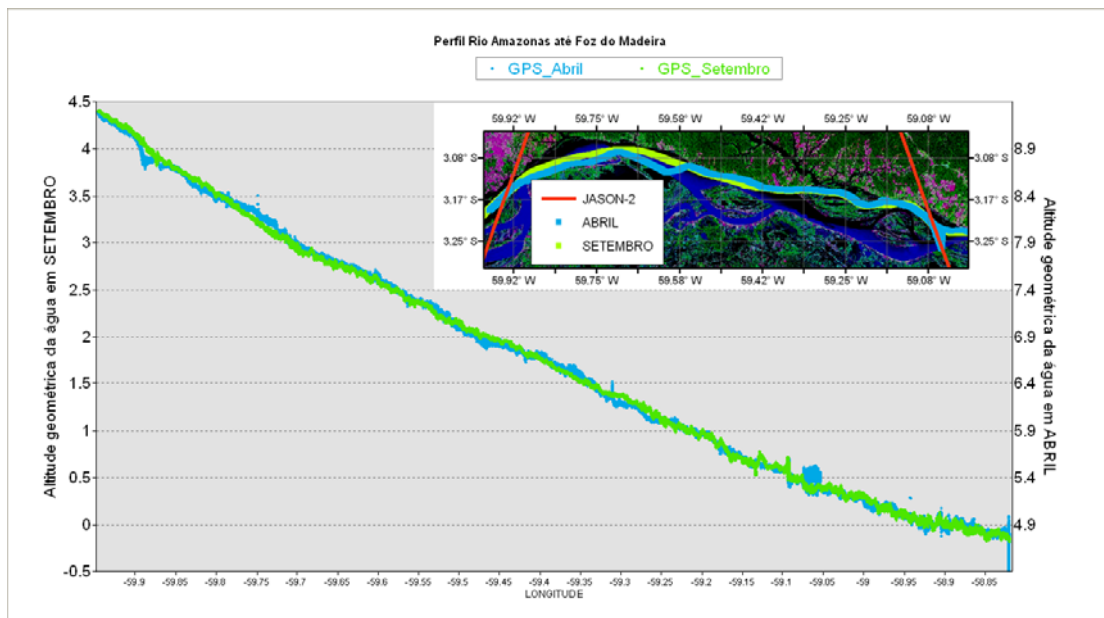
#### **7.4.2 Aplicações de Dados GPS para Análises das Séries Hidrológicas**

Os perfis GPS e réguas niveladas em uma referência comum também permitem fazer análises da variação de perfil dos rios através das séries hidrológicas niveladas a uma referência comum. A partir dos dados obtidos nas réguas, pode-se estimar a variação temporal da declividade dos cursos de água. A seguir, no gráfico da Figura 7.46, que une as leituras de três réguas estudadas, pode-se observar a declividade entre elas e a boa correlação nas leituras caracterizadas pelo ciclo hidrológico homogêneo na área de estudo. Porém é notória a variação de perfil na cheia, com aumento de 50 centímetros da declividade, entre as réguas de Santa Luzia e Manaus em relação com a régua de Iracema, próxima ao encontro do rio Madeira.



**Figura 7.46- Gráfico de comparação entre as observações em 3 estações fluviométricas**

Paradoxalmente, durante a cheia, é esperada uma diminuição da declividade devido à diminuição do coeficiente de Manning (CHOW, 1959), que causa perda de energia do rio e diminuição da velocidade. Entretanto, tal comportamento pode ser justificado por outras características hidrodinâmicas, como, talvez, a influência do rio Madeira na estação de Iracema. Em uma análise do perfil no gráfico na Figura 7.47, em duas passagens do barco com variações de 4,5 metros do nível de água, não foram encontradas alterações no perfil.



**Figura 7.47 – Perfil longitudinal do rio entre as estações de Santa Luzia e Iracema.**

Pelo perfil da Figura 7.47, estima-se que a variação mostrada na Figura 7.46 das réguas de Santa Luzia e Manaus em relação à Iracema pode, provavelmente, ser causada pela instabilidade no local de Iracema. Deve-se levar em conta o efeito de compactação do solo durante a seca e expansão com o seu umedecimento durante a cheia, efeito este que pode causar movimentos verticais nas estações durante os períodos de seca e cheia. A construção do perfil do rio, de forma periódica, seria uma boa ferramenta de auxílio para a definição das séries hidrológicas.

#### 7.4.3- Nivelamento das Seções Batimétricas obtidas por ADCP ou Ecobatímetros

Os perfis GPS servem, também, para nivelar as seções batimétricas, que podem ser obtidas por ADCP ou ecobatímetro. Durante as campanhas, foram realizadas várias medições ADCP, conforme descritos anteriormente. Essas informações serão futuramente usadas para cálculo de variáveis hidráulicas como as descritas no item 7.4.4 a seguir, e também na busca de uma relação entre a batimetria do rio e altura elipsoidal da superfície da água, estimando-se pelo fato das seções serem feitas perpendiculares ao fluxo do rio, podendo, portanto serem teoricamente consideradas uma seção equipotencial. As variações do elipsóide e do geóide também podem ser expressas por variações do fundo do rio. A seguir, na Figura 7.48, segue o exemplo de uma das seções transversais niveladas por GPS e obtidas via ADCP.

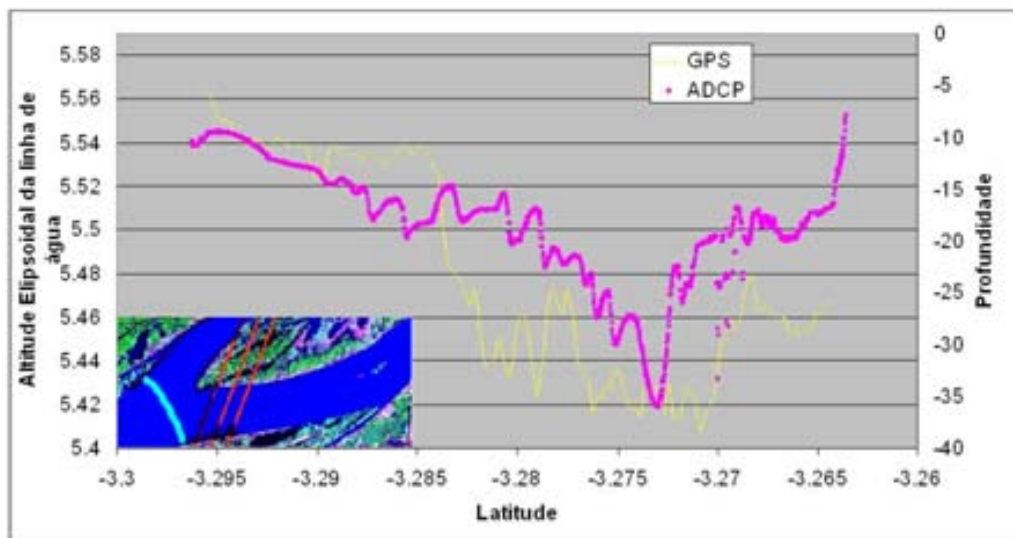


Figura 7.48- Gráfico da profundidade e da linha de água em Santa Luzia.



#### 7.4.4 Determinação da Variação Temporal do Coeficiente de Manning

A partir de dados disponíveis no banco de dados da rede nacional de hidrometeorologia (HIDROWEB/ANA), podem ser conduzidos vários estudos hidrológicos. Todavia, conforme anteriormente citado, algumas aplicações ficam restritas no caso das cotas das estações fluviométricas se encontrarem em diferentes referenciais altimétricos. Uma dessas aplicações consiste na determinação do coeficiente de Manning, que representa a rugosidade de um determinado trecho de um rio. Esse coeficiente é importante na modelagem hidrodinâmica, pois a rugosidade, que pode ser definida como a resistência lateral provocada pelo contato da água com as margens do rio, causa perda da energia adquirida pelo escoamento e, em consequência, perda de sua velocidade. O coeficiente de Manning é um importante fator na previsão de níveis de água, com interesse para a modelagem hidrodinâmica.

Como forma de aplicação, segue o procedimento para o cálculo do coeficiente de Manning para o trecho entre duas estações localizadas no alto rio Negro, estações fluviométricas de Cucuí, de código 14110000 (HIDROWEB/ANA), e São Felipe, código 14250000 (HIDROWEB/ANA), sendo as mesmas descritas na Figura 7.49.

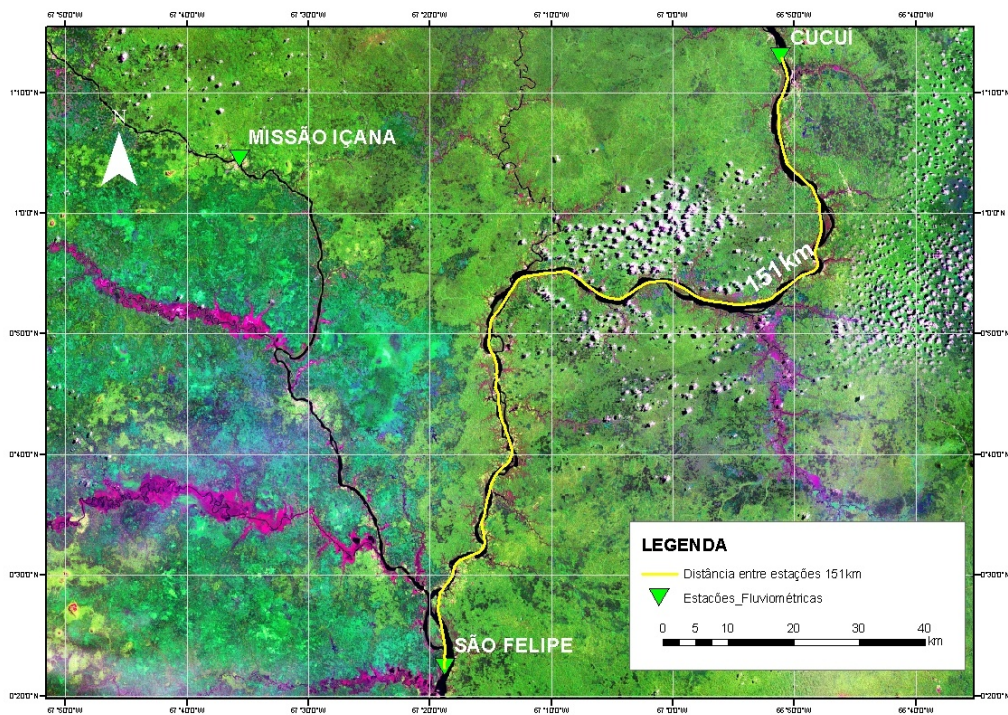


Figura 7.49- Estações fluviométricas de Cucuí e São Felipe.

Uma série de variáveis estão relacionadas na determinação do coeficiente de Manning. A informação completa e fórmulas podem ser vistas em CHOW (1959). Duas dessas variáveis são dependentes de informação altimétrica oriundas de um mesmo referencial. A primeira delas é a declividade da linha de água no trecho em que se deseja calcular o coeficiente de Manning. Geralmente, esse dado é fornecido pelas cotas niveladas de duas estações fluviométricas. A segunda diz respeito à declividade do fundo do rio nessa mesma área, dado usualmente obtido pelas seções batimétricas das duas estações niveladas sob a mesma referência. Os dados de nivelamento por receptores GPS foram obtidos através da campanha executada pelo IRD no rio Negro em 2005, cedidos gentilmente para aplicação neste estudo.

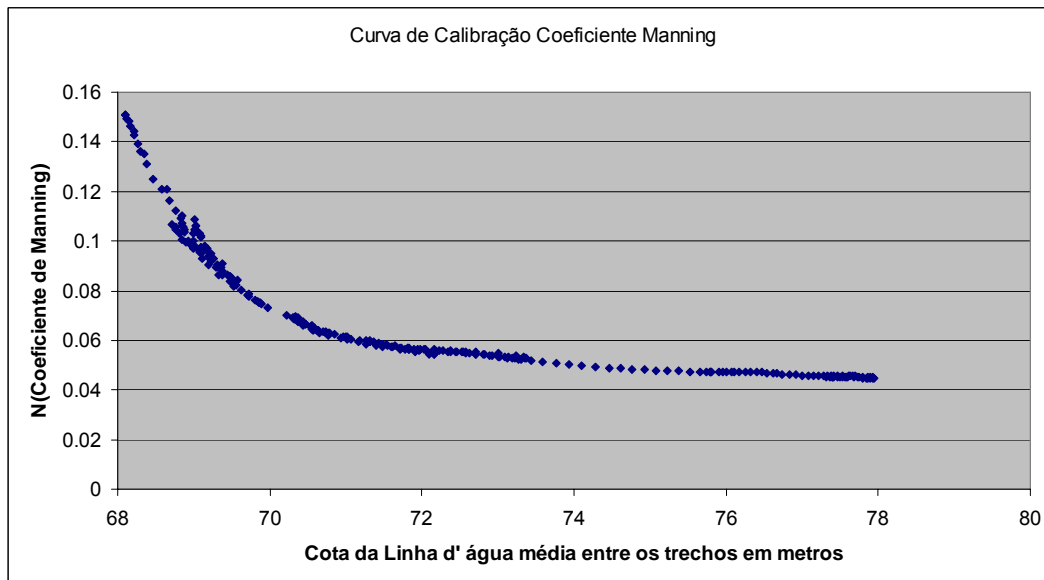
De forma resumida, as seguintes operações são necessárias:

- nivelamento dos zeros arbitrários das réguas linimétricas por receptores GPS;
- nivelamento das seções batimétricas das estações linimétricas (podendo ser feito por receptores GPS sobre o barco durante as medições de batimetria, demonstrados na Figura 7.47, ou utilizando a cota de água já nivelada pela estação linimétrica considerada nula a declividade da água entre a régua e seção batimétrica);
- aplicação de um modelo de ondulação geoidal para dar significado físico às altitudes elipsoidais levantadas pelos receptores GPS; neste caso foi indicado o uso do EGM08;
- cálculo da distância percorrida pelo rio entre as duas estações, sendo possível ser executada por levantamentos GPS cinemáticos ou imagens de satélite com resolução apropriada.
- coleta de dados hidrológicos a partir da série histórica do HIDROWEB/ANA (vazão, perfil transversal, cotas), com correção desses dados a uma referência altimétrica comum;
- aplicação da fórmula de Manning (CHOW, 1959), descrita a seguir:

$$n^2 = \frac{\left[ \left( z_1 + h_1 + \frac{Q_1^2}{2g \cdot A_1^2} \right) - \left( z_2 + h_2 + \frac{Q_2^2}{2g \cdot A_2^2} \right) \right]}{\left[ \frac{\left( \frac{Q_1^2}{A_1^2 \cdot Rh_1^{4/3}} \right) + \left( \frac{Q_2^2}{A_2^2 \cdot Rh_2^{4/3}} \right)}{2} \right]} \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (7.1)$$

Nessa Equação (7.1), as altitudes de fundo do rio das estações de São Felipe e Cucuí são representadas respectivamente pelas constantes  $z_1$  e  $z_2$ , sendo seus dados fornecidos pela seção batimétrica nivelada de cada estação. As cotas dos níveis de água e as vazões nas seções de São Felipe e Cucuí são respectivamente representadas pelas variáveis  $h_1$ ,  $Q_1$ ,  $h_2$  e  $Q_2$ . Podem ser acessadas a partir de valores medidos. Por fim, as áreas das seções molhadas e os raios hidráulicos das seções São Felipe e Cucuí, respectivamente representados pelas variáveis  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $Rh_1$  e  $Rh_2$ , podem ser encontrados a partir de relações matemáticas entre valores de cota linimétrica do dia e perfil batimétrico da seção.

A partir das operações descritas acima, para cada dia da série hidrológica, pode-se obter o valor do coeficiente de Manning relacionando o seu valor com o valor da declividade do trecho de estudo, conforme descrito na Figura 7.50.



**Figura 7.50-** Coeficiente de Manning no trecho entre as estações de São Felipe e de Cucuí.

O resultado da curva de calibração do coeficiente de Manning encontra-se nos valores entre 0,04 para a cota máxima e de 0,15 para a cota mínima estudada. A variação das cotas, nesse período, foram de 80 metros para 68 metros, tendo a variação da lâmina de água atingido cerca de 12 metros entre os trechos no período de 01/07/2002 a 1/03/2003. A variação dos valores também encontram-se de acordo com a literatura (CHOW, 1959), que relata a diminuição do coeficiente com o aumento dos níveis de água, fato que se deve principalmente ao armazenamento de água nas planícies de inundação (STRASSER *et al.*, 2007). Os valores encontrados são próximos aos obtidos por LEON (2006) em trechos do rio Negro, contudo, ao invés de nivelamento via receptores GPS, foram utilizados dados de altimetria por satélites, em particular o uso do satélite Envisat. LEON (2006) encontrou valores de coeficiente de Manning entre 0,032 a 0,11, dando indícios da boa aplicabilidade da altimetria espacial como auxílio no cálculo do coeficiente de Manning.



## CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho apresentado teve como seu objetivo principal o estabelecimento de um referencial altimétrico para avaliação da tecnologia de altimetria espacial. Esse referencial foi estabelecido com êxito através de receptores do sistema de posicionamento global (GPS), seqüenciados em etapas, a saber: ajuste das estações permanentes GPS existentes na área de influência do estudo, nivelamento das estações fluviométricas e obtenção de perfis da declividade da linha de água.

No que concerne aos objetivos específicos, foram avaliados dados do modelo de geóide EGM08 e dados gravimétricos convertidos para dados de deformação radial do satélite GRACE. A partir dos resultados gerados por este estudo, apresentam-se, na seqüência do texto, as conclusões.

- O código computacional GINS do CNES/GRGS mostrou-se uma boa solução no tratamento de dados GPS. Durante o trabalho, foram realizados mais de 10 mil processamentos, comprovando a potencialidade desse código, capaz de fácil automatização e com uma vasta possibilidade de configuração e métodos de processamento como métodos PPP e dupla diferença, que permitiram uma escolha mais adequada dos resultados.
- Na determinação da rede de referência, o método PPP mostrou-se altamente válido, atingindo o resultado esperado. Em especial, na presente pesquisa, que contou com longas séries temporais de dados GPS, observou-se a eficiência do método PPP, o que motiva a sua recomendação em outros estudos da mesma natureza.
- As soluções GPS de dupla diferença, segundo o prisma adotado nesta dissertação, mostraram os problemas causados pela falta de modelagem da variação vertical das coordenadas de estações de referência, o que ocasiona a propagação de erros por toda a rede de estações GPS utilizadas.
- A forte correlação entre o ciclo hidrológico da região Amazônica e os fenômenos de carga, que causam deslocamento da crosta nessa região, foi identificada, permitindo a geração de uma equação linear entre efeitos de cargas e variação do nível de água na região estudada, em particular a partir do emprego da estação fluviométrica de Manaus.

- As variações da coordenada vertical nos locais de medição no tempo e no espaço afetam de maneira significativa (em torno de 10 centímetros) o resultado final da série de altimetria espacial. Por essa razão, a determinação dos fenômenos de carga ao longo das linhas de satélite e nas estações hidrológicas contribuem, de forma relevante, na avaliação de séries de altimetria espacial.
- Os satélites GRACE mostraram uma boa correlação dos seus sinais com os deslocamentos verticais detectados por receptores GPS. Todavia, o fator de deslocamento calculado a partir dos dados dos satélites GRACE devem ser melhor estimados.
- O processo feito para nivelamento das réguas linimétricas, a partir de receptores GPS, contribui para uma proposta metodológica inicial de nivelamento para a rede hidrometeorológica nacional administrada pela ANA, onde, em princípio, as estações fluviométricas encontram-se sob referência altimétrica arbitrária.
- Os dados de receptores GPS em modo cinemático, obtidos mediante o deslocamento de um barco, mostram um grande potencial para avaliação de modelos de geóide, para obtenção de características hidráulicas como declividade e nivelamento de seção ADCP, além da grande contribuição para a avaliação dos dados de altimetria espacial.
- O uso do modelo de geóide EGM08 atenua grande parte da declividade elipsoidal encontrada na região de estudo do trabalho. Comparações em regiões equipotenciais ou de baixíssima declividade foram respondidas satisfatoriamente pelo modelo EGM08, dando bons indícios da qualidade do modelo para a região na representação das características hidrodinâmicas dos corpos de água e gerando boas expectativas de contribuição para outras regiões.
- Receptores da TRIMBLE, NOVATEL e GTR-2 mostraram ser eficientes e com boa precisão para aquisição dos dados processados durante este trabalho.
- Procedimentos básicos, como a instalação de pelo menos dois (2) receptores GPS e posicionamento de suas antenas em regiões mais estáveis como o meio do barco, nivelamento de antenas através de bases muito

curtas e aplicação de velocidade baixa e constante durante as medições do barco, ajudam a diminuir sensivelmente os movimentos do barco e, em consequência, erros na estimativa da declividade da linha de água.

- A reocupação periódica por receptores GPS nas referências de nível das régua linimétricas são fundamentais para detectar movimentos do solo no local de estação fluviométrica, como é o caso da estação de Santa Luzia.
- Essa foi a primeira rede fluviométrica concebida para o emprego de avaliação de dados altimétricos espaciais. A criação dessa rede hidrológica, voltada para a pesquisa, gerou diversos benefícios na formação de recursos humanos e internalização institucional desse conhecimento, com apropriação do conhecimento intrínseco a região de estudo. Destaca-se, ainda, que os benefícios, sob o ponto de vista econômico, superam os baixos investimentos de instalação e manutenção da rede estabelecida.

As aplicações do sistema GPS confirmaram ser esta a tecnologia mais apropriada na forma de avaliação das medidas geradas pela altimetria espacial. Para melhores resultados e aquisição de novas informações, seguem algumas recomendações.

- Para melhor interpretação dos deslocamentos verticais ao longo do tempo, sugere-se o uso de uma rede global utilizando o método de dupla diferença.
- As variações verticais obtidas em estações permanentes GPS são ações de diferentes fenômenos de cargas. Recomenda-se a separação dos diversos fenômenos através de modelagens hidrológica e atmosférica, procurando identificar as correspondentes influências dessas componentes. Essa ação pode auxiliar na compreensão desses fenômenos, no entendimento da sua extensão, de sua intensidade e de seu tempo de resposta no que tange ao movimento vertical.
- Para os dados do satélite GRACE, recomenda-se o uso de séries oriundas de diferentes metodologias e sem a redução de efeitos de cargas atmosféricas e oceânicas. Adicionalmente, enfatiza-se a necessidade de serem realizadas comparações complementares com as estações GPS

permanentes disponíveis, de forma a se estimar se possíveis diferenças podem advir de fontes de modelos utilizados pelo GRACE.

- O método PPP do GINS está tendo uma série de melhorias como a estimação de ambigüidades inteiras e processamento de alta frequência. Recomenda-se, no futuro, o reprocessamento das estações permanentes e o processamento dos dados cinemático de forma a se avaliar a evolução desse código computacional.
- As pequenas diferenças entre o modelo de geóide e os dados cinemáticos GPS devem ser melhor analisadas e avaliadas. Essas diferenças são provenientes de questões hidrodinâmicas ou falta de resolução do modelo de geóide. Nesse sentido, dados de batimetria e de velocidade dos cursos de água, por exemplo, podem fornecer algumas informações importantes.
- Para regiões onde não é possível obter informações da declividade da linha de água a partir de receptores GPS, ressalta-se a importância da utilização do modelo de geóide EGM08 para extração de dados de altimetria espacial, fato que pode reduzir significativamente efeitos de declividade na seleção dos dados altimétricos. O estudo realizado detectou, na área de estudo, maior declividade elipsoidal em relação à declividade ortométrica, obtida com aplicação do geóide EGM08.
- Recomenda-se ainda o uso de modelagem hidrodinâmica em conjunto com dados de linha de água obtidos por GPS cinemático e de batimetria e de velocidade (ADCP e GPS) para melhor compreensão e aproveitamento mútuo dos resultados gerados tanto pelo modelo quanto pela qualidade de dados GPS.
- A instalação de novas estações permanentes GPS e hidrológicas, que permitem uma melhor avaliação dos diferentes fenômenos que causam deformação da crosta terrestre e auxiliam na avaliação de tecnologias tão importantes como a altimetria espacial e dados dos satélites GRACE.

Finalmente, espera-se que esta dissertação estimule o desenvolvimento de novas pesquisas voltadas para a avaliação e aplicação de dados altimétricos por satélites, com a perspectiva de emprego na modelagem hidrológica, na modelagem hidrodinâmica, em Geodésia e em outros campos do conhecimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, Claudinei Rodrigues e CAMARGO, P. O (2006). . Modelagem em Tempo Real do Erro Sistemático das Observáveis GPS Devido à Ionosfera. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 101-120, 2006.
- ALTAMIMI, Z., P. SILLARD, AND C. BOUCHER (2002), ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, J. Geophys. Res., 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561, 2002.
- ALTAMIMI, Z., X. COLLILIEUX, J. LEGRAND, B. GARAYT, AND C. BOUCHER (2007), ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, J. Geophys. Res., 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- ALTAMINI (2009) : Reference Frames for Satellite Geodesy, 2nd International Galileo Colloquium, Padova, Italy, 14-16 Oct., 2009
- BEVIS, M., D. ALSDORF, E. KENDRICK, L. P. FORTES, B. FORSBERG, R. SMALLEY JR., AND J. BECKER (2005), Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response, Geophys. Res. Lett., 32, L16308, doi:10.1029/2005GL023491.
- BERGEOT, N., M. N. BOUIN, M. DIAMENT, B. PELLETIER, M. RE'GNIER, S. CALMANT, AND V. BALLU (2009), Horizontal and vertical interseismic velocity fields in the Vanuatu subduction zone from GPS measurements: Evidence for a central Vanuatu locked zone, J. Geophys. Res., 114, B06405, doi:10.1029/2007JB005249.
- BIANCALE, R.(2002) : 1ère Ecole d'Été du GRGS, Forcalquier: France, 2002, Notas decurso de verão, CNES/GRGS.
- BIANCALE.R.;MARTY. J.-C; LEMOINE. J.-M, M. SARRAILH;F. PEROSANZ; S. MELACHROINOS ; S. LOYER (2008): 2ème formation GINS-PC, CNES / GRGS, Observatoire Midi-Pyrénées, 24-26 novembre 2008.
- BIRKETT, C. M. et al. (2002). Surface water dynamics in the Amazon basin: Application of satellite radar altimetry. Journal of Geophysical Research. 107(D20), 8059, doi:10.1029/2001JD000609.
- BLITZKOW, Denizar; CAMPOS, Ilce de Oliveira; FREITAS, Silvio Rogério Correia de (2002). Altitude: o que interessa e como equacionar?. In: Blitzkow, Denizar;

- Cintra, Jorge Pimentel; Paciléio Netto, Nicola; Fonseca Júnior, Edvaldo Simões, eds. Informações espaciais II : notas de aulas. São Paulo. Parte 2, p.21-30.
- BOCK, H., R. DACH, A. JÄGGI, G. BEUTLER; (2009): High-rate GPS clock corrections from CODE: Support of 1 Hz applications. *Journal of Geodesy*, vol. 83(11), pp. 1083-1094, DOI 10.1007/s00190-009-0326-1.
- CALMANT, S. e SEYLER, F. (2006). Continental surface water from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*. 338(14-15), 1113-1122, doi: 10.1016/j.crte.2006.05.012.
- CALMANT S., H. LEE, A-E SOUZA, C. K. SHUM, F. SEYLER, Z. HUANG, J. SANTOS DA SILVA, D. MEDEIROS MOREIRA, F. NINO, S. BETTADPUR, J. RIES, B. TAPLEY, G. COCHONNEAU, O. ROTUNNO FILHO, F. VAZ DE ALMEIDA, E. DE OLIVEIRA (2009), JASON-2 IGDRs for flood alert in the Amazon Basin, OSTST meeting, Seattle, WA, June 22-24, 2009
- CALMANT S., (2009) : Rapport de Mission CAMPAGNE FOAM, Septembre 2009 (GPS week 1550-1551).
- CAMPOS, I.; MERCIER, F.; MAHEU, C.; COCHONNEAU, G.; KOSUTH, P.; BLITZKOW, D., (2001). Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry; application to the Amazon basin. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planetes*. 333, 1-11.
- CHELTON, D.B., J.C. RIES, B.J. HAINES, L.L. FU, P.S. CALLAHAN(2001), *Satellite Altimetry, Satellite altimetry and Earth sciences*, L.L. Fu and A. Cazenave Ed., Academic Press.
- CHOW, V. T. (1959), *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York
- DALAZOANA, R. (2005). Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileira. Tese de Doutorado, CPGCG, UFPR, 188pp
- DARWIN, G.H., On variations in the vertical due to elasticity of the Earth's surface, *Phil. Mag.*, Ser. 5, col. 14, N. 90, 409-427, 1882. Disponível em [http://gemini.gsfc.nasa.gov/aplo/darwin\\_1882/](http://gemini.gsfc.nasa.gov/aplo/darwin_1882/)
- DeMETS, C., R. G. GORDON, D. F. ARGUS, S. STEIN (1994), Effect of recent revisions of the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21(20), 2191-2194.

- DOW, J.M., NEILAN, R.E., GENDT, G. (2005), "The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade," *Adv. Space Res.* 36 vol. 36, no. 3, pp. 320-326, 2005. doi:10.1016/j.asr.2005.05.125
- DOW, J.M., NEILAN, R. E., RIZOS(2009), C., The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy* 83:191–198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3
- DZIEWONSKI, A. M., e D. L. ANDERSON (1981). Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, pp. 297-356.
- FARRELL, W. E., (1972), "Deformation of the Earth by Surface Loads," *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, pp. 761–797.
- FAZILOVA D., PEROSANZ F., RAMILLIEN G., CRETAUX J.F., MELACHROINOS S., SOUDARIN, L., (2006), Time-variable vertical deformations determined from GRACE and in-situ GPS data, European Geosciences Union , Vienna, Austria.
- FREITAS, S.R.C.; BLITZKOW, D.(1999). Altitudes e geopotencial. *IGeS Bulletin – Special Issue for South America*, n. 9, 1999, p. 47-62.
- FORTES, L.P.S. e GODOY, R.A.Z.(1991): Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema de Posicionamento Global – GPS. Coletânea de Trabalhos Técnicos do XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo.
- GEMAEL, C.(1999), *Introdução à Geodésia Física*. Curitiba: UFPR.
- GETIRANA, Augusto Cesar Vieira ; ROTUNNO FILHO, O. C. ; BONNET, Marie-Paule ; MANSUR, Webe João ; CALMANT, S. ; ROUX, E (2009). . Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall-runoff modeling and spatial altimetry. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, v. 379, p. 205-219.
- IERS CONVENTIONS (2003). Dennis D. McCarthy and Gérard Petit. (IERS Technical Note ; 32) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. 127 pp., paperback, ISBN 3-89888-884-3 (print version).
- LE BLIGUET, G (2009) : *Mesure des Déformations des Pyrénées par Campagnes Gps: Élaboration d'une Stratégie de Traitement Avec le Logiciel GINS et Impact des Effets de Surcharges*. Mémoire de Travail de Fin d'études ESGT.
- LEFEVRE, F., F. LYARD, C. Le PROVOST, and E.J.O. SCHRAMA (2002) : FES99 : a tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information, *J. Atm. Oceano. Tech.*, 19 (9), 1345-1356, 2002.

- LEON, J.G, CALMANT, S., SEYLER, F., BONNET, M.P., CAUHOPE, M., FRAPPART, F., FILLIZOLA, N. (2006). Rating curves and estimation of average depth at the upper Negro river based on satellite altimeter data and modelled discharges. *Journal of Hydrology* 328 (3-4), 481-496.
- LEON, J.G, (2007): Utilisation conjointe de l'altimétrie spatiale et de la mesure in-situ pour la régionalisation du débit dans le Bassin Versant du Rio Negro. These, Université Paul Sabatier - Toulouse III (2006-05-29)
- LUZ, R. T. (2008). Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS. xxi, 179 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), CPGCG/UFPR, Curitiba.
- LOYER, S. (2007) : Traitement des données GPS avec GINS, *Manual de descrição do software GINS*.
- LYARD, F., F. LEFEVRE, T. LETELLIER, AND O. FRANCIS (2006), Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004, *Ocean Dyn.*, 56, doi:10.1007/s10236-006-0086-x.
- MELACHROINOS, S. (2007) : Positionnement Géodésique à Haute Fréquence De Réseaux Gns Terrestres Et Marins, PHD Thesis
- MONICO, J. F. G. (2000), Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS. Descrição, fundamento e aplicações. 1. ed. Presidente Prudente: Editora Unesp, 2000. 287 p.
- MONICO, J. F. G. (2000b). Posicionamento por ponto de alta precisão utilizando o GPS: uma solução para a geodinâmica. *Rev. Bras. Geof.*, Mar 2000, vol.18, no.1, p.39-48. ISSN 0102-261X
- NASA, (2003): Studying Studying the Earth's Gravity from Space: The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), disponível em [http://eosps0.gsfc.nasa.gov/ftp\\_docs/GRACE\\_Fact\\_Sh\\_Final.pdf](http://eosps0.gsfc.nasa.gov/ftp_docs/GRACE_Fact_Sh_Final.pdf)
- NIELL A. E., (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radiowavelengths, *J Geophys Res*, vol. 101 (B2), pp. 3227-3246
- PAVLIS N.K., HOLMES S.A., KENYONS.C., FACTOR J.K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008; apresentado em 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13–18. Disponível em [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/NPavlis&al\\_EGU2008.ppt](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/NPavlis&al_EGU2008.ppt)



- PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C.( 2003). Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. Journal of Global Positioning System, v.2, n.2, p.90-99, 2003.
- PEROSANZ,F.(2002): GPS pour la géodesie : la mesure géométrique in BIANCALE, R. 1ère Ecole d'Eté du GRGS, Forcalquier: France, 2002.
- PEROSANZ.F ; LOYER,S ;MARTY J.C ; BIANCALE.R ; MELANCHROINOS.S (2008): Traitement de mesures GPS avec GINS-PC. École d'été du GRGS 2008 forcalquier.
- RAMILLIEN, G.; F. FRAPPART; A. CAZENAVE; A. GUNTNER (2005) :Time variations of the land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids, Earth and Planetary Science Letters, n. 235, p.283-301.
- RAY, R., (1999): A Global Ocean Tide Model From TOPEX/POSEIDON Altimetry: GOT99.2 ,NASA Technical Memorandum, NASA/TM-1999-209478, National Aeronautics and Space Administration,GoddardSpaceFlightCenter, Greenbelt, MD.
- ROSMORDUC, V., J. BENVENISTE, O. LAURET, C. MAHEU, M. MILAGRO, N. PICOT(2009), Radar Altimetry Tutorial, J. Benveniste and N. Picot Ed., disponível em <http://www.altimetry.info>.
- RUEGG, J. C.; RUDLOFF, A.; VIGNY, C.; MADARIAGA, R.; DE CHABALIER, J. B.; CAMPOS, J.; KAUSEL, E.; BARRIENTOS, S.; DIMITROV, D (2009) : Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitucion and Concepcion in Chile, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol 175, 78-85. 2009.
- SANTOS DA SILVA, J.; ROUX, E.; ROTUNNO FILHO, O. C; SEYLER, F.; CALMANT, S.(2008) ERS-ENVISAT Altimetry over the Amazon basin : Quality assessment, applications and perspectives. Remote Sensing of Environment, submetido, 2008.
- SILVA. J S DA (2010) - Tese A Ser Defendida em 26/03/2010, pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.
- SAPUCCI e MONICO (2001) Transformação De Helmert Generalizada No Posicionamento de Alta Precisão: Fundamentação Teórica e Exemplificações in Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 18(2).
- SEEBER, G., (1993). Satellite Geodesy: Foundations, Methods & Applications. Walter de Gruyter, BerlinNew York, 531pp.

- SEYLER, F.; CALMANT, S.; SANTOS DA SILVA, J.; FILIZOLA, N.; ROUX, E.; COCHONNEAU, G.; VAUCHEL, P.; BONNET, M-P. (2008). Monitoring water level in large trans-boundary ungauged basin with altimetry: the exemple of ENVISAT over AmazonBasin. *Journal of Applied Remote Sensing – SPIE*. 7150, 715017, doi: 10.1117/12.813258.
- STRASSER et al. (2007) Workshop Previsão de Vazões, ONS, disponível em [http://www.ons.org.br/download/previsao\\_vazoes/artigos\\_sessao/AT\\_Sess%C3%A3o24\\_a.pdf](http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o24_a.pdf)
- STRASSER (2008), MAXIMILIANO ANDRÉS Dunas fluviais no rio Solimões-Amazonas - Dinâmica e transporte de sedimentos -[Rio de Janeiro] 2008XII, 148 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- TAPLEY, B. D., S. BETTADPUR, M. WATKINS, C. REIGBER (2004), The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.
- VALS TOOL (2009). Virtual ALtimetry Station. Version 0.5.7. August 2009. Accessible in [http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels\\_test.php](http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php). Acesso em 21/02/2010
- VAN DAM, T.M. and T.A. HERRING, (1994): Detection of atmospheric pressure loading using Very Long Baseline Interferometry measurements, *J. Geophys. Res.* 99(B3), pp. 4505—4518.
- VAN DAM, T. M., G. BLEWITT, AND M. B. HEFLIN(1994b), Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations, *J.Geophys. Res.*, 99, 23,939–23,950,
- VAN DAM, T. M. , J. WAHR(1998), Modeling environment loading effects: A review, *Phys. Chem. Earth*, 23(9-10), 1077–1087.
- VAN DAM, T., J. WAHR, P. C. D. MILLY, A. B. SHMAKIN, G. BLEWITT, D.LAVALLEE, AND K. M. LARSON(2001), Crustal displacements due to continental water loading, *Geophys. Res. Let.*, 28(4), 651–654.
- VASCONCELLOS, José Carlos Penna de. (2003) Estudo de metodologia para vinculação e homogeneização de redes geodésicas GPS: Implementação de um programa de ajustamento. 2003. 194 p.. Tese (Doutorado) - ESC POLITECNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- WMO (World Meteorological Organization)(1994). Guide to hydrological practices.Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Others

Applications. World Meteorological Organization, WMO-n°168. 5a ed. 735p,  
Geneva.

XU, G., (2007), GPS: Theory, Algorithms and Applications 2nd Edition, Springer.

## ANEXOS

### ANEXO A – DESCRIÇÃO DO ARQUIVO RINEX

No código computacional GINS, os dados são processados a partir dos arquivos em formato universal RINEX (*Receiver INdependent Exchange*), desenvolvido pelo Instituto de Astronomia da Universidade de BERN, que permite uniformizar os dados dos variados tipos de receptores e fabricantes.

Abaixo segue a descrição, linha a linha, do arquivo RINEX que pode ser encontrada também no sítio <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/rinex/rinex211.txt>.

#### Arquivo RINEX

- **2.11 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE**

O valor 2.11 refere-se à versão do RINEX utilizada. O G(GPS) é o tipo de dado contido no arquivo, também podendo ser M (MIXED) quando tiver dados de outras técnicas GNSS.

- **teqc 2008Oct2 20090303 20:19:20 UT CPGM / RUN BY / DATE**

O valor teqc 2008oct2 representa o programa e sua versão utilizada para criação do arquivo RINEX, enquanto o valor 20090303 20:19:20 é a data e hora de criação do arquivo RINEX. UT representa o tempo universal.

- **40891190 MARKER NAME**

- **4089 MARKER NUMBER**

Descreve o nome e número da estação 4089. Representa a identificação do receptor ou local, e 1190 representa o dia 119 do ano do levantamento GPS, enquanto o 0 indica a primeira série de coleta durante esse dia.

- **0220294089 TRIMBLE 5700 NP 1.24/ SP 0.00 REC # / TYPE / VERS**

- **00000000 TRM29659.00 ANT # / TYPE**

Descrição do receptor (TRIMBLE 5700), incluindo sua versão e o tipo de antena (TRM29659.00).

- **3285900.9542 -5452422.0916 -392053.1339 APPROX POSITION**

- **0.1100 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N**

Posição aproximada em coordenadas cartesianas (X,Y,Z) da medição GPS e deslocamento do centro de fase para o ponto de referência da antena (ARP).

• **1 1 WAVELENGTH FACT L1/2**

Fatores para os comprimentos de onda L1 e L2; o número 1 indica utilizar o ciclo completo de ambigüidades.

• **7 L1 L2 C1 P2 P1 S1 S2 # / TYPES OF OBSERV**

Sete (7) é o número de observáveis ; L representa medidas de fase; C pseudodistância pelo código C/A; P pseudodistância pelo código P; S representa a qualidade dos sinais SNR (*signal noise ratio*); poderia ainda existir a letra D para medições Doppler; os números 1 e 2 representam as frequências.

• **30.000 INTERVAL**

• **2009 1 1 0 0 30.0000000 TIME OF FIRST OBS**

• **2009 1 2 0 0 0.0000000 TIME OF LAST OBS**

Os valores acima representam a frequência ou taxa de aquisição das observáveis descritas acima, indicando data de início e fim das observáveis.

• **31 # OF SATELLITES**

• **2 1061 1065 1012 1012 1061 PRN / # OF OBS**

Número de satélites observados (31) e demonstração de uma linha que representa o satélite PRN (2), com as quantidades de suas medições para cada uma das 5 observáveis descritas anteriormente.

• **09 1 1 0 0 30.0000000 0 11 2 5 9 10 12 14 15 21 24 29 30**

Após o fim do cabeçalho (END HEADER), começam as observáveis, sendo descritos 09 1 1 0 0 30 respectivamente para o ano de 2009, 1 janeiro , às zero hora e 30 segundos; o 0 a seguir representa que não houve falhas entre a leitura anterior e atual; o número 11 representa a quantidade de satélites e os demais números os respectivos PRN de cada satélite observado.

• **-52597196.02316 22894085.62506 -40876075.46558 22894083.38348 4939.34400**

Os números acima representam os valores das observáveis, sendo as medidas de fase em ciclos inteiros e a pseudodistância em metros.

## ANEXO B – PROCEDIMENTOS DE CONFIGURAÇÃO DO GINS

### Criação do arquivo de estações

O GINS necessita que as estações a serem processadas estejam descritas em um arquivo de estações, apesar do cabeçalho do arquivo RINEX conter algumas das informações fundamentais para o processamento de dados GPS como o tipo de antena e coordenadas *a priori*. É preciso descrever cada estação a utilizar nesse arquivo.

O GINS contém todas as informações das estações da rede ITRF2005 descritas no seu arquivo de estação. Na Tabela B1, segue um exemplo com as estações da RBMC a serem incluídas no arquivo de estação e suas mais importantes informações descritas no arquivo de estações, como o código, o nome da estação, tipo de antena, coordenadas cartesianas *a priori*, velocidades do movimento das placas tectônicas e placa tectônica de origem.

**Tabela B1 – Exemplo de dados do arquivo de estações GINS-PC.**

station	site	X(m)	Y(m)	Z(m)	Xp(mm/an)	Yp(mm/an)	Zp(mm/an)	plaque	source
11111	NAUS	3179409.37	-5519130.672	-334110.079	-0.0028	-0.0025	0.0121	SOAM	i05i05
1111111	NAUS		0	0	0	TRM41249.00			
22222	URUK	3285899.915	-5452420.644	-392052.801	-0.0027	-0.0025	0.0121	SOAM	i05i05
2222222	URUK		0	0	0	TRM29659.00			
33333	SAGA	2486243.773	-5873685.318	-15906.826	-0.0036	-0.0015	0.0114	SOAM	i05i05
3333333	SAGA		0	0	0	TRM41249.00			
44444	MAPA	4005461.162	-4963550.323	5162.242	-0.003	-0.0024	0.0126	SOAM	i05i05
4444444	MAPA		0	0	0	TRM29659.00			
55555	POVE	2774265.619	-5662060.13	-959415.985	-0.002	-0.0029	0.0116	SOAM	i05i05
5555555	POVE		0	0	0	TRM29659.00			
66666	BOAV	3117452.219	-5555487.82	314480.738	-0.0039	-0.0015	0.012	SOAM	i05i05
6666666	BOAV		0	0	0	TRM55971.00			
77777	MABA	4156055.658	-4801656.512	-592100.66	-0.002	-0.0033	0.0127	SOAM	i05i05
7777777	MABA		0	0	0	TRM55971.00			

Para o cálculo das velocidades horizontais das estações da RBMC, foi utilizado o modelo do ITRF2005 incluso no pacote do código computacional GINS-PC.

## Pré-Tratamento

Nos arquivos RINEX, aplica-se o pré-tratamento nos dados (*prarie*) nas observáveis GPS, onde se detectam e se reparam dois dos mais importantes tipos de erros encontrados nas observáveis. Esses erros são os saltos do relógio do receptor e perdas de ciclos da portadora. Também é feito o processamento não diferencial dos dados, onde são eliminados dados de passagens curtas de um satélite ou com grande desvio padrão sobre as ambigüidades. São eliminados dados incompletos onde existe ausência de alguma observável (medidas sobre o código P1 e P2, e fases L1 e L2).

Os arquivos de saída *prarie* contêm as informações de combinação linear das frequências L1 e L2, tanto para estação como para cada satélite com objetivo de eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Também são estimadas as ambigüidades N1 e Nw ao longo das observáveis de fase e código. Pode-se ainda diminuir a taxa de frequência das observáveis, caso seja mais conveniente, deixando os arquivos de saída menores. O arquivo de saída *prarie* já está pronto para ser executado pelo GINS no modo não-diferencial (PPP).

A execução do comando *prarie* é aplicado uma vez para cada arquivo rinex, o que torna o processo lento e repetitivo quando se trata de longas séries de dados. Nesta dissertação, foram tratados mais de dez mil arquivos RINEX. Para esse tratamento, foi necessário automatizar o comando *prarie* fazendo com que ele busque todos os arquivos RINEX, aplique o comando *prarie* e defina o nome do arquivo de saída. Foi desenvolvido um *script* em linguagem *bash* para Linux que, em poucas horas, fez o pré-tratamento de todos os arquivos RINEX do presente estudo, convertendo, então, para os arquivos de saída *prarie*.

### Criação de arquivos dupla diferença

A partir dos arquivos *prarie*, pode ser feita a criação do arquivo de dupla diferença com o comando *double90*, que realiza uma relação com diferentes tipos critérios (LOYER, 2007):

1. em primeiro lugar, são formadas as linhas de base entre as estações com mais medidas em comum (datas e satélites);
2. formação de medições de passagens longas com mesma ambigüidade por dupla diferença;

3. utiliza o máximo de medidas não diferenciáveis possíveis;
4. gera conjuntos de medições independentes; uma medida não diferenciável pode inicialmente participar de várias medições de dupla diferença; não se deve formar duplas diferenças ligadas por combinações lineares; por exemplo, caso seja formada a linha de base A-B e B-D, o programa não formará a linha de base A-D; uma medida formada por combinações lineares não fornece muita informação adicional e pode gerar complicações na inversão da matriz de correlação das medições.
5. A última restrição é fazer os cálculos rapidamente, mesmo que sejam para grandes redes de centenas de estações.

Na prática, um número de diferentes conjuntos de duplas diferenças será formado a partir de um conjunto de medidas não diferenciáveis, pois não se pode explorar todas as possibilidades e escolher aquela que maximiza a passagem mais longa e o número de dados não diferenciáveis utilizados (itens 2 e 3). Uma passagem GPS representa o conjunto de medições de fase que tem a mesma ambigüidade; em dupla frequência, é definida por um período sem saltos de ciclos entre as duas frequências, caracterizando que, em uma mesma passagem, as ambigüidades são constantes

Os critérios 2 e 3, no entanto, não são independentes, e o algoritmo a seguir pode formar longas passagens com muitos dados não diferenciáveis.

Da mesma forma que o comando *prarie*, o comando Double90 também precisou ser automatizado, pois os arquivos *prarie* que servem de entrada devem ser combinados anteriormente para formar um arquivo único contendo todas as estações a serem processadas e posteriormente executado o comando Double90, sendo necessária essa operação para cada dia a ser processado. Como solução desse problema, foi desenvolvido um algoritmo que busque os arquivos *prarie* a partir de uma lista que contém o nome de suas estações, fazendo que o algoritmo una as estações da lista e depois processe o comando Double90.

### **Arquivo Diretor do GINS**

A partir dos arquivos *prarie* e dupla diferença, pode-se fazer o processamento dos dados nos modos não-diferencial e dupla diferença. Para resolução da rede na região Amazônica, é necessário criar um arquivo de configuração para o processamento; nele



serão escolhidos a estratégia de processamento, parâmetros e modelos de correção, órbitas e relógio. Cada linha do arquivo diretor corresponde a uma informação, que pode utilizar os arquivos auxiliares na base local do computador ou na base de dados do BERENICE, computador do CNES.

O arquivo diretor do GINS abrange todos os tipos de medidas GPS, LASER, GRACE, entre outras. Portanto existe uma série de parâmetros que não necessitam ser configurados na medição GPS. A descrição dos parâmetros do arquivo diretor pode ser encontrada no manual do GINS (LOYER, 2007), em língua francesa, e no trabalho de GWENNAEL (2009).

A seguir, seguem as informações mais importantes e que podem ser modificadas do arquivo diretor para configuração de dupla diferença utilizada neste trabalho:

- **1 pole/default pole CPOLE**

A primeira informação relaciona-se ao modelo de marés polares; na primeira parte, a opção 1 significa a aplicação do modelo 0 significa a sua não utilização. A opção *default* é aplicada pelo modelo segundo a convenção do IERS 2003 para o pólo médio:  $m1=0.065$ ;  $m2=0.330$  arcsec; as informações estão armazenadas na base de dados BERENICE.

- **1 lunisolaires/de405bdlf.ad planetes PLANE**

A linha acima relaciona as influências do Sol e da Lua sobre a crosta terrestre, causando o fenômeno de marés terrestres, sendo aplicado o modelo de correção desse efeito segundo as convenções do IERS (2003), cujas informações estão armazenadas na base de dados BERENICE.

- **.temp.TP/DANIEL/Stations\_ITRF2005 stations CSTAT**

Acima, é descrito o caminho local no computador do usuário do arquivo de estações onde estão contidas as informações das estações utilizadas no processamento.

- **1 antex/igs\_default.atx antex ANTEX**

Arquivo com modelos de antena seguindo as correções IGS05.atx, onde as correções do centro de fase da antena são dependentes da elevação dos satélites observados.

- **1 charge/ocean/load\_fes2004 loading OLOAD**

A linha acima confirma a aplicação do modelo de correção de cargas oceânicas FES2004 sobre as estações a serem processadas; escolheu-se essa opção por algumas das estações de referência se encontrarem em região de forte carga oceânica.

- **0 charge/atmosphere/default cont. load. ALOAD**

Na linha superior, o zero define a não aplicação do modelo de cargas atmosféricas baseado nos dados do modelo meteorológico ECMWF; foi escolhida essa opção por querer quantificar os efeitos verticais causados por carga atmosférica nas estações a serem processadas.

- **1 .temp./valeurs\_a\_priori valeurs a pri APRIO**

No arquivo de valores *a priori*, são atribuídas as modificações dos valores iniciais e restrições quanto à variação desses parâmetros durante o processamento. Os parâmetros que podem ter variações restritas ou modificadas são ambigüidades, correção troposférica, posição de estações em cada uma de suas coordenadas.

**Tabela B2- Exemplo do arquivo de valores *a priori*.**

Atributo	MOD	Correção
[S????????????????????]	0.00E+00	1.00E+01
[MNA????????????????]	0.00E+00	8.00E-01
[MNG????????????????]	0.00E+00	3.00E+04
[MNS????????????????]	0.00E+00	1.00E+04
[MZD????????????????]	0.00E+00	1.00E+00
[MND????????????????]	0.00E+00	1.00E+01
[SH??????????11111M001??]	0.00E+00	1.00E-04
[SP??????????11111M001??]	0.00E+00	1.00E-13
[SL??????????11111M001??]	0.00E+00	1.00E-13

- **0 horloges/IGS/default horloges HORLH**

A linha acima resume-se à escolha de um arquivo de relógio para correção dos receptores das estações em dupla diferença; não há necessidade dessa correção; portanto, a mesma foi desativada.

- **2 orbites/IGS/default mesures haut MESH1**

Acima, significa os tipos de efemérides precisas a serem usadas; no caso, são escolhidas as órbitas IGS, que são uma combinação das órbitas de vários centros de análises.

- **1 .temp./GPSDATA/AAAA/DDD/SSSSSSS.dd mesures haut MESH2**

Esta linha do arquivo diretor tem como finalidade especificar o arquivo a ser processado. O formato dessa linha foi escolhido de forma a deixar ser facilmente alterada via script, onde AAAA representa o ano, DDD representa o dia, e os 7 caracteres S representam o arquivo a ser processado, enquanto a extensão dd significa dupla diferença.

- **0 0 0 0 0 3 9999 0 30 impression,elimination IMPRE**

A linha reflete os dados que serão utilizados e os dados que serão eliminados. O número 3 significa a eliminação com menos de 3 passagens. A opção 9999 significa a eliminação de valores com resíduos maiores que 9,999 metros, e a opção 30 significa a utilização de dados na frequência de 30 segundos. As outras opções com número 0 não são significativas para tratamento de dados GPS.

- **0 0 0 0 0 -1 archivage ARCHI**

As opções indicam a criação de arquivos das equações normais geradas durante ou ao fim do processamento; a opção -1 escolhida gera as equações normais após a interação suplementar e sua convergência.

- **JUL50 19.000000 date bulletins BULCC**
- **JUL50 19.000000 JUL50 44019.000000 date debut/fin arc DATDF**

Nas duas linhas acima, são expressas informações da data; o formato utilizado pelo GINS é o dia Juliano 1950 e os segundos desse dia; o GINS ainda trabalha em TAI (Tempo Atômico Internacional), onde o tempo GPS é o tempo TAI – 19 segundos. Por isso, os segundos seguem com valor inicial 19. A palavra JUL50 será substituída via script pelo dia do processamento; o número 44019.00000 representa o segundo final do processamento.

- **12 -2ECMWF 8 35000e-02 -.35000e-00 mes.,freq.,trop.,pond. (m HMESU**

A linha acima caracteriza informações sobre a medição; o número 12 representa o tipo de medida de GPS de dupla diferença; ECMWF significa utilizar o modelo ECMWF para corrigir o atraso troposférico com base na inclinação zenital e por parâmetros de troposfera seca e úmida fornecida pelo modelo. O número 8 representa o número de parâmetros troposféricos a serem estimados. Os valores 35000e-02 -.35000e-00 são o desvio padrão de modelos *a priori*, sendo mantidos os valores padrão (*default*).

- **1000 10 10 4 4 5 120 2000 elevations min HMODM**

O número 1000 permite especificar os critérios de eliminação das medidas não diferenciáveis, representadas pelos dois números 10, que são os ângulos de fase e distancia respectivamente; os demais valores aplicam-se aos resíduos de fase e distância.

- **-1 07 0 0 0 0 0 0 fin correction mesuresHMODM**

A linha acima caracteriza a eliminação de um satélite ou estação; o numero -1 indica a eliminação de um satélite e o 07 o número desse satélite; durante os primeiros testes, verificou a necessidade de remover esse satélite por problemas na sua antena; essa linha pode ser repetida quantas estações e satélites forem necessários eliminar.

- **0.000000 07 10 .50000e-01 0 0 0 0 0 pas,itr,cvg,iopt,reg,cow, INTEG**

O número 07 representa o número mínimo de iterações; o número 10 indica o número máximo, e .50000e-01 é um valor de critério de convergência, para o qual foi escolhida a opção pré-estabelecida (*default*).

- **-2 99 11 1 00000000 stations (lib,xyz,vit) LISTA**

A opção -2 significa o ajuste das coordenadas na iteração suplementar com arquivo de equações normais, para depois ser calculada a solução final através do DYNAMO. O número 99 representa o ajuste de todas as estações; o número 11 significa a representação das coordenadas em latitude e longitude e altura elipsoidal e o ajuste das velocidades. O número 1 representa o período da representação da

coordenada; no caso, como a solução é semanal, a coordenada será representada pela quarta-feira da semana.

- **GPS\_\_CORRI\_WL** **LFREE**

Ativação da correção Wide-Lane para medições de dupla diferença

- **GPS\_\_CDP\_ELEV** **LFREE**
- **GPS\_\_CDP\_AZIM** **LFREE**

Ativação das correções do centro de fase da antena em função da elevação e do azimute.

- **GPS\_\_PHASE\_WINDUP** **LFREE**

Correções de fase wind-up nas medidas dupla diferença e não diferenciáveis.

- **STOP ELIMINATION 05** **LFREE**

Para a eliminação de dados na quinta iteração.

- **FIXE AMBI 0602 0.17** **LFREE**

Fixa as ambigüidades inteiras; no caso, 06 representa a iteração, e 02 representa o método QIF com ionosfera quase livre. O valor 0.17 representa a tolerância máxima entre o valor real e o valor fixo.

- **GPS\_\_QUALITEORB 0.037** **LFREE**

Pondera os cálculos segundo a qualidade das órbitas.

- **GPS\_\_AFFICHE\_PASS** **LFREE**

Permite o arquivamento das estatísticas de passagens GPS para posterior desenvolvimento e resolução de problemas.

Em toda relação de comandos acima, foram descritas as principais opções da configuração utilizada para os cálculos de dupla diferença; como nas operações anteriores, foi necessário gerar um script para criar um arquivo diretor para cada cálculo.

## Execução do arquivo diretor na interface gráfica GINS-PC

Depois de criado o arquivo diretor, pode-se acessar a interface gráfica do GINS através do comando `ginspc-ihm.bash` usado no terminal do Linux . Na interface gráfica do GINS, carregam-se todos os arquivos diretores selecionados para posteriormente executá-los; feito isso, o GINS irá processá-los em série. Durante o processo, são executadas as seguintes etapas:

- envio dos arquivos contidos no computador do usuário;
- verificação da disponibilidade dos arquivos solicitados à base do servidor Berenice;
- criação do arquivo FIC;
- envio do arquivo FIC e arquivo `prepars`;
- execução do arquivo `fic` no computador local;
- criação do arquivo `listing` e arquivos de equações normais.

Durante o processamento dos arquivos diretores, o GINS informa possíveis erros que impossibilitam a execução dos dados, como falha na conexão, ausência de arquivos fundamentais ao processamento ( arquivos de estação, efemérides, entre outros) e falhas de memória.

O arquivo **FIC** contém todos os dados necessários para o processamento de acordo com a estratégia escolhida no arquivo diretor; o arquivo `fic` traz consigo modelos de troposfera, maré solida, polar, modelos de carga, correções de antena, efemérides e relógios, valores iniciais das ambigüidades e atraso zenital.

O arquivo **prepars** representa um relatório da criação do arquivo `fic`, no arquivo `prepars`; contém informações sobre os dados que não puderem ser contabilizados como ausência de modelos físicos para uma determinada estação, dados de estações ausentes e outros avisos de erros que podem ajudar na interpretação em caso de falha no processamento do dado.

### Arquivo Listing

O arquivo `listing` é o arquivo que contém as informações do processamento dos dados; ele é gerado se os dados necessários para o processamento estão contidos no

arquivo fic; caso não estejam, será informado, no arquivo prepar, o motivo da falha. O arquivo listing contém milhares de linhas, contudo algumas informações são fundamentais para a boa qualidade do processamento. No arquivo listing, devem ser analisadas informações e avisos de erros ou ausências de algum dado ou mudança de procedimentos . Seguem alguns exemplos de avisos informados pelo arquivo listing:

```
*** warning (G-affecte_antex) : antenne du satellite 66607 non trouvee
*** warning (G-lecddif) : On applique la ponderation issue des orbites GPS selon
sig**2 = (sig**2 + sig**2(qualite/0.37E-01)**2 )/2
*** warning (G-eqna) : Valeurs Diagonales Nulles pour 639 parametres du type
MND
```

A primeira linha reflete a falha na determinação da posição da antena do satélite 07. Na segunda linha, avisa o uso de ponderação sobre a qualidade das órbitas sobre a equação descrita. A última linha informa números de diagonais nulas para o parâmetro de ambigüidades de dupla diferença.

No arquivo listing, contém outras informações importantes como a taxa de fixação de ambigüidades inteiras. Além de descrever as informações das linhas de base como distância, número de medidas e passagens. Pode-se analisar os procedimentos envolvidos em cada iteração do processamento, analisando-se o número de medições eliminadas separadas por satélite, além de acompanhar o resíduo de cada um deles, ver a correção e desvio padrão de cada parâmetro como correções troposféricas, ambigüidades e resolução das coordenadas terrestres, casp seja requisitado através do arquivo diretor.

### **Arquivo de Equações Normais**

No GINS, pode ser gerado o arquivo de equações normais, no qual, através da cadeia de aplicativos DYNAMO incluso no pacote GINS, pode-se manipulá-las , sendo possível reduzi-las, acumulá-las, permutá-las e finalmente invertê-las.

Para este trabalho, foram geradas soluções de duração de 12 horas; foi gerada uma equação normal para cada 12 horas, para atingir o objetivo do processamento de dupla diferença de obter soluções semanais; para cada estação, aplicaram-se os seguintes procedimentos nas equações normais:

- 1) Permutação entre as 14 equações normais geradas para cada uma semana de dados; a permutação é necessária quando algumas incógnitas são comuns a

duas equações, caso que acontece em equações pertencentes ao mesmo dia. A aplicação da permutação se dá através do comando executado no terminal do Linux `exe_dynamo_p.ksh`

- 2) Redução das equações normais; tem como objetivo separar parâmetros externos dos parâmetros internos das matrizes das equações normais; os parâmetros internos já estão estimados como o caso da ambigüidade; os parâmetros externos, como o caso das coordenadas das estações que realmente interessam, e essa separação reduz consideravelmente o tamanho das matrizes o que vai influir na velocidade dos cálculos, algo extremamente importante em grandes redes geodésicas. A aplicação da redução dá-se pelo comando no terminal do Linux `exe_dynamo_b.ksh`
- 3) A acumulação das equações normais tem como objetivo unir as equações normais que tiveram que ser cortadas e processadas separadamente; normalmente, devido a limitações de memória causada por grande quantidade de estações e grandes períodos de observação, como é o caso deste trabalho, foram reunidas 14 soluções de metade de um dia e geradas equações normais semanais. A aplicação da acumulação é feita pelo comando do `exe_dynamo_b.ksh` executado no terminal do Linux.

Na Tabela B.3, segue o exemplo da acumulação mostrando os elementos das diagonais.

**Tabela B.3: Elementos das diagonais e respectivos pesos.**

[SP 2008122433333M001	4	3	6	8
	7	10	9	10
	8	10	6	5
	6	9		
[SL 2008122433333M001	4	4	6	9
	6	10	10	9
	9	7	4	
	5	9		
[SH 2008122433333M001	4	5	6	9
	7	9	9	9
	8	9	7	4
	6	8		

Na Tabela B.3, tem-se a notação SP (Latitude), SL (Longitude) e (SH altura); os números subseqüentes indicam a data 2008(ano), 12 (mês), 24 (dia), que representa a



quarta feira, dia escolhido para representar a semana. O código 33333M001 representa a estação SAGA de São Gabriel da Cachoeira; os demais valores são o peso de cada um dos 14 períodos de 12 horas na acumulação da equação semanal.

Por fim, foi feita a resolução das equações normais semanais, invertendo as matrizes normais e determinando os parâmetros externos usando o comando `exe_dynamo_d.ksh` no terminal do Linux. Para a resolução das equações normais, uma série de parâmetros podem ser aplicados como, por exemplo:

- restrições na variação dos 14 parâmetros (translação, rotação, fator de escala e suas velocidades) da rede; pode-se restringir o grau de liberdade de cada parâmetro e mesmo especificar a uma lista de estações de rede para seus correspondentes cálculos, usados para soluções de redes livres.
- restringir a solução de uma coordenada em relação ao valor *a priori* na tabela de estações; pode ser usado para fixar estações de uma rede, deixando que o cálculo seja resolvido entre os movimentos das demais estações em relação as estações fixas.

Para este trabalho, conforme descrito anteriormente, foi utilizada a opção de manter as estações da rede de referência do ITRF2005 com suas coordenadas fixas. Após a resolução de equações normais, é gerado o arquivo com a solução das coordenadas para cada semana, bem como as ambigüidades e parâmetros de correção troposférica. Segue abaixo o exemplo de correção de coordenada da estação 11111 (NAUS do IBGE) descrito no arquivo de soluções.

**Tabela B4- Exemplo da solução das coordenadas calculadas pelo GINS**

INCÓGNITA	VALOR INICIAL	CORREÇÃO	VALOR FINAL	SIGMA
[SP 2009090911111M001	-0.0527598690	0.0000000081	-0.0527598771	0.0000000000
[SL 2009090911111M001	5.2350275282	0.0000000019	5.2350275301	0.0000000000
[SH 2009090911111M001	94.4219690628	0.0159196434	94.4378887062	0.0004223925

Os valores de latitude (SP) e longitude (SL) estão em radianos, e os valores de Altura (SH) estão em metros.

### **Processamento PPP (Posicionamento por Ponto Preciso)**

O método PPP, no GINS, foi aplicado em todas as estações utilizadas no método de dupla diferenças, de forma a se avaliar as variações de coordenada de cada estação de forma independente. Foi escolhida para o GINS uma configuração menos complexa em relação ao modo de dupla diferença, onde as soluções de coordenadas foram resolvidas diretamente sem a necessidade de manipulação das equações normais na cadeia DYNAMO. Para o modo PPP, foi escolhida uma amostragem de 30 segundos com soluções diárias usando o mesmo período de 1 ano e meio de dados para cada estação; posteriormente, foi processada toda série os dados das estações NAUS e POVE, estações da RBMC do IBGE, de forma a analisar melhor seus resultados. A configuração do arquivo diretor pode ser vista no **ANEXO C**. Também, para o modo PPP, foi utilizado um algoritmo de automatização do processamento.

## ANEXO C – ARQUIVO DIRETOR DO GINS

0	.....	gravite	POTEN
0	.....	marees	MAROC
0	.....	baro.	BAROI
0	.....	press.	PRESA
0	.....	mss	SMOCE
0	.....	flux	CFLUX
0	.....	atmosphere	MATMO
0	.....	albedo	ALBIR
1	pole/default	pole	CPOLE
0	.....	cte	NUTTE
0	.....	ctr	NUTTR
1	lunisolaires/de405bdlf.ad	planetes	PLANE
0	.....	sat.	SATNA
0	.....	quasars	QUASA
1	.temp.TP/DANIEL/Stations_ITRF2005_n	stations	CSTAT
1	antex/igs_default.atx	antex	ANTEX
1	horloges/IGS/default	hor	PBSTA
0	.....	problemes	ACCEL
0	.....	accelero	OLOAD
1	charge/ocean/load_fes2004	loading	ALOAD
0	charge/atmosphere/default	cont. load.	APRIO
1	vap/valeurs_a_priori_PPP	valeurs a pri	HORLH
0	.....	bulletins h1	BULH1
0	.....	bulletins h2	BULH2
0	.....	bulletins b1	BULB1
0	.....	bulletins b2	BULB2
2	orbites/IGS/default	mesures haut	MESH1
1	.temp./GPSDATA/AAAA/DDD/SSSSSS.pra	mesures haut	MESH2
0	.....	mesures bas1	MESB1
0	.....	mesures bas1	MESB1
0	.....	mesures bas1	MESB1
0	.....	mesures bas2	MESB2
0	.....	mesures bas2	MESB2
0	.....	mesures bas2	MESB2
0	0 0 0 0 0 3 9999 0 90	impression,elimination	IMPRE
0	0 0 0 0 0 0	archivage	ARCHI
JUL50	19.000000	date bulletins	BULCC
JUL50	19.000000 JUL51 19.000000	date debut/fin arc	DATDF
0	0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 0.000000		DATES
0	0.65400E-01 0.33060E+00 0.19600E-02 0.36700E-02 2000.00	pole	moyen(as)
haut	-----		POLEM
0	0 2 0 0 3 0 0 000 0 0gv,ls,fc,ft,ps,mt,mo,rl,pa,		TYPES
0	0 0 0 0		FORCE
0	0 .00000e+01 .00000e+00 .00000e+00 .00000e-01	radiation,ssurm	XXCDG
0	.00000e+01 .00000e+00 .00000e+00	albedo,consol,cospec	RADIA
0	.00000e+01 .00000e+00 .00000e+01	thermique	ALBEM
0	.00000e+00 .00000e+00 .00000e+00	r-bias,per,demi-per,jour	THERM
			RBIA

0	.00000e+00	.00000e+00	.00000e+00	t-bias,per,demi-per,jour	TBIAS				
0	.00000e+00	.00000e+00	.00000e+00	n-bias,per,demi-per,jour	NBIAS				
0	.00000e+00	.00000e+00	.00000e+00	x-bias,per,demi-per,jour	XBIAS				
0	.00000e+00	.00000e+00	.00000e+01	y-bias,per,demi-per,jour	YBIAS				
0	.00000e+00	.00000e+00	.00000e+00	z-bias,per,demi-per,jour	ZBIAS				
-10	0	0	0	.00000e-00	.00000e-00	mes.,freq.,trop.,pond. (m	HMESU		
111						tourne les eph. dans le r.t.	HMODM		
0	0	0	0	0	0	0	fin correction mesures	FINME	
11	3ECMWF	8	.35000e-02	.35000e-00	mes.,freq.,trop.,pond. (m		HMESU		
-1	07	0	0	0	0	0	fin correction mesures	HMODM	
8	0	0	0	0	0	0	prise en compte de horl	HMODM	
1000	10	10	4	4	5	120	2000	elevations min	HMODM
991	0	0	0	0	0	0	0	prise en compte de horl	HMODM
288	0	0	0	0	0	0	0	passages a cheval	HMODM
10	1	0	0	0	0	0	0	donnees en TAI	HMODM
0	0	0	0	0	0	0	0	fin correction mesures	FINME
0.000000	03	12	.50000e-00	0	0	0	0	pas,itr,cvg,iopt,reg,cow,	INTEG
com	-----							TYPES	
00000000000000000000000000000000	atmosphere (tt,h,he,o,n2)							LIBAT	
0	0	000					potentiel (lib,dmin,dmax)	LIPOT	
0	00						marees oceaniques (lib)	LIMAR	
0	0	0					pole (x,y) et tu1 (lib)	LIPOL	
-1	99	00	0	00000000				stations (lib,xyz,vit)	LISTA
0	0	0					topo dynn	LITOP	
free	-----							TYPES	
GPS__SIG__SATE_	0000	0000	0000	Estat num,sigp,sigc(mm)					
GPS__CDP__ELEV								LFREE	
GPS__CDP__AZIM								LFREE	
GPS__PHASE__WINDUP								LFREE	
GPS__QUALITEORB	0.037							LFREE	
GPS__AFFICHE__PASS								LFREE	
LGAIN	2								

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)