

GEODÉSIA APLICADA AO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DA
BACIA AMAZÔNICA

Daniel Medeiros Moreira

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
Stéphane Calmant
Félix Perosanz

Rio de Janeiro
Setembro de 2016

GEODÉSIA APLICADA AO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DA
BACIA AMAZÔNICA

Daniel Medeiros Moreira

TESE 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 DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Dr. Stéphane Calmant, D.Sc., HDR

Dr. Félix Perosanz, D.Sc.

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

Prof. Denizar Blitzkow, D.Sc.

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2016

Moreira, Daniel Medeiros

Geodésia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica/ Daniel Medeiros Moreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XXV, 229 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Stéphane Calmant

Félix Perosanz

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 203-217.

1. Geodésia. 2. Estudos hidrológicos. 3. Monitoramento por satélite. 4. Amazônia. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À Achiles Eduardo
Monteiro (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores de tese, Otto Corrêa Rotunno Filho (COPPE/UFRJ), Stéphane Calmant (IRD/LEGOS) e Félix Perosanz (CNES/GRGS). Todos os três, cada um em sua especialidade, foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Mais do que essa contribuição, foram, também, além, dando todo o suporte, amizade e oportunidades. Não tenho palavras para agradecer todo o apoio de vocês durante toda essa jornada.

A meu eterno chefe e amigo, Achilles Eduardo Monteiro (*in memoriam*), grande amigo e incentivador da minha pesquisa. Sem ele, jamais teria êxito neste trabalho e, por essa razão, dedico esta tese a ele, por toda a sua generosidade e bondade que me possibilitaram chegar até aqui e realizar diversas conquistas.

Dirijo agradecimento especial aos membros examinadores desta tese, em particular à Dra. Frédérique Sabine Vachald Seyler (IRD/LMTG), ao professor Webe João Mansur (COPPE-UFRJ), ao professor Denizar Blitzkow (Escola Politécnica/USP). Ao professor Denizar Blitzkow, em especial, agradeço pelas observações e contribuições, que foram fundamentais para compor o texto que constitui a versão final desta tese.

Aos colegas e amigos da CPRM do Escritório de Rio de Janeiro. Todos, sem exceção, sempre me incentivaram e me apoiaram nesta jornada. Pela CPRM de Manaus, estendo o meu sincero obrigado a Andre Santos, que foi um grande amigo e parceiro, sendo fundamental seu apoio para conclusão desta tese, e a Marco Oliveira, por todo suporte e ajuda sempre que solicitados. Ao Bosco, Manuel, Evaldo e todos os 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!

À Lígia Maria Nascimento de Araujo, grande amiga, que foi fundamental no meu processo de formação como engenheiro e pesquisador.

Ao grande amigo tricolor, Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, que muito me ajudou neste trabalho dando conselhos e todo o suporte quando necessário.

A Jean François Crétaux, pesquisador do Legos/CNES, pelo suporte durante minhas passagens em Toulouse e campanhas de campo em que tivemos oportunidade de participar conjuntamente.

À Joecila Santos da Silva, que contribuiu, além de sua amizade e conhecimento, com dados de altimetria espacial utilizados nesta tese, gerados pelo grupo RHASA da Universidade Estadual da Amazônia (UEA), o qual eu também estendo os meus sinceros agradecimentos.

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

Aos professores da Área de Recursos Hídricos e de Meio Ambiente do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, pelo apoio e conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Civil (PEC) da COPPE/UFRJ e do GET/GRGS/LEGOS/UPS pelo suporte institucional.

Aos técnicos e pesquisadores do GRGS, LEGOS, ANA, COPPE, UPS 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.

Dirijo especial agradecimento ao projeto Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões Amazonas, que proporcionou a geração e a consolidação de grande parte dos dados

coletados e 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.

Ao IRD, que através do programa *Bourses d'échanges scientifiques et technologiques* (BEST), possibilitou estágios técnicos que foram fundamentais para aprendizado das tecnologias utilizadas nesta tese.

À CPRM que, através da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial, do Departamento de Hidrologia, da Divisão de Hidrologia Aplicada, da Divisão de Hidrologia Básica, SUREG-MA e GEHITE-MA, sempre apoiou a minha pesquisa concedendo as liberações para estágios em Toulouse e fornecendo todo o suporte para as campanhas de campo realizadas.

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

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.

Complementarmente, em nome do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LABH2O) do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, agradeço, ainda, o suporte da FAPERJ pelo apoio financeiro através dos projetos PEC/COPPE -

FAPERJ 014/2010 (2010-2012), FAPERJ – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014), FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012, FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) –E-26/010.002980/2014, projeto FAPERJ No. E_12/2015, ao CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 e ao projeto MCT / FINEP / CT-HIDRO (2005-2016) , bem como à Secretaria de Educação Superior (SESu) – Ministério da Educação (MEC) - FNDE – Programa de Educação Tutorial - PET CIVIL UFRJ, pelo contínuo apoio à pesquisa científica no Brasil.

À minha amada esposa Dayane Candido, que me incentiva, que me apóia e que me ajuda com todo seu amor e dedicação. Obrigado por toda sua ajuda na revisão do texto em português e do texto em francês; além disso, obrigado por toda sua paciência e cumplicidade durante o desenvolvimento desta tese.

Por fim, os meus mais profundos agradecimentos a Deus, à minha mãe Sonia Moreira, ao meu irmão Bruno Moreira e ao meu pai Flávio Machado Moreira (*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 Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

GEODÉSIA APLICADA AO MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DA
BACIA AMAZÔNICA

Daniel Medeiros Moreira

Setembro/2016

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

Stéphane Calmant

Félix Perosanz

Programa: Engenharia Civil

O presente estudo fundamenta-se na avaliação do emprego de dados geodésicos para o monitoramento e para a modelagem dos recursos hídricos da bacia Amazônica, a partir da hipótese de que os princípios da Geodésia permitem ampliar, em quantidade e em qualidade, o conjunto de informações observacionais hidrológicas disponíveis nessa importante região hidrográfica. Delimitou-se, como principal objetivo, o levantamento de altitudes ortométricas do zero das estações fluviométricas da rede convencional e a obtenção de perfis de declividade da linha de água dos principais rios Amazônicos em uma escala inédita. Nesse sentido, empregou-se procedimento de processamento de dados GNSS para aferir a precisão da técnica de posicionamento por ponto preciso (PPP), o que permitiu contrastar a sua eficiência face às técnicas clássicas e suas recentes inovações. Complementarmente, com o objetivo de alcançar melhor precisão nos levantamentos geodésicos, os efeitos de cargas hidrológicas também foram mensurados a partir do uso das séries de dados do satélite GRACE, oriundas de quatro diferentes centros de análise (CSR, JPL, GFZ e GRGS), em conjunto com o modelo de correção de carga hidrológica HYDL. Os resultados mostraram que essas fontes de informação ofereceram suporte na correção de cargas hidrológicas de 18 estações GNSS existentes na bacia Amazônica. Em especial, identificou-se que o emprego de dados de réguas e de perfis da linha de água definidos por receptores GNSS permitiu avaliar, de forma inovadora e rigorosa, a precisão de dados altimétricos dos satélites Jason-2, ENVISAT e ICESAT, com potencial e abrangente uso em estudos hidráulico-hidrológicos de monitoramento e de modelagem em diversas escalas espaço-temporais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

GEODESY APPLIED TO HYDROLOGIC SURVEYS OVER AMAZON BASIN

Daniel Medeiros Moreira

September/2016

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho

Stéphane Calmant

Félix Perosanz

Department: Civil Engineering

This study is based on the evaluation of the use of geodetic data for monitoring and modeling of water resources of the Amazon basin, assuming the hypothesis that the principles of Geodesy allow to expand the set of observational hydrological information with respect to quantity and quality in order to make them available for this important river basin. The main objective was to establish a protocol to level the gauged stations of the conventional network and to get steepness profiles for the water line of the main Amazon rivers on an unprecedented scale. Accordingly, we used GNSS data processing procedure to measure the accuracy of the precise point positioning (PPP) technique, which allowed to investigate its efficiency when compared to the classical techniques and their recent innovations. In addition, in order to achieve better accuracy in geodetic surveys, the effects of hydrologic loads were also measured by means of the use of data series acquired through GRACE satellite, coming from four different analysis centers (CSR, JPL, GFZ and GRGS) jointly with the hydrologic load correction model HYDL. The results showed that these sources of information offered support in correcting hydrologic loads of 18 GNSS stations existing in the Amazon basin. In particular, it was found that the use of data from leveled gauged stations and water line profiles defined by GNSS receivers allowed the evaluation of the accuracy of altimetry data in such an innovative and rigorous manner as derived from Jason-2, ENVISAT and ICESAT satellites highlighting their potential and widespread use in hydraulic-hydrological studies of monitoring and modeling on various spatiotemporal scales.

Résumé de la Thèse présentée à la COPPE/UFRJ comme partie des conditions nécessaires pour obtenir le grade de Docteur en Science (D.Sc.)

APPORT DES DONNÉES DE GÉODÉSIE SPATIALE POUR L'ÉTUDE DU
BASSIN HYDROLOGIQUE AMAZONIEN

Daniel Medeiros Moreira

Septembre/2016

Directeurs de thèse: Otto Corrêa Rotunno Filho

Stéphane Calmant

Félix Perosanz

Programme: Ingénierie Civile

L'objectif principal de ce travail de thèse a été d'étudier l'utilisation des données de géodésie spatiale pour la surveillance des ressources hydriques du bassin de l'Amazone et dans modélisation de son cycle hydrologique. Nous sommes partis de l'hypothèse que ces données augmentent la qualité et la quantité des observations hydrologiques disponibles sur cet important bassin. Nous avons évalué en particulier, l'apport des données GNSS au travers de la technique innovante du Positionnement Précis du Point (PPP). L'utilisation de cette méthode pour des données de récepteurs installés sur des bateaux, nous a permis de niveler les stations hydrométriques du réseau conventionnel et d'obtenir des profils en long des principaux affluents de l'Amazone à une échelle sans précédent, en particulier pour ce qui concerne la pente de la ligne d'eau, paramètre essentiel en hydrodynamique mais très peu documenté jusqu'à présent. Afin d'obtenir la meilleure précision pour les levés géodésiques, les effets de charge hydrologique sur la croûte terrestre ont également été pris en compte et modélisés à partir des séries de données du satellite GRACE de quatre centres d'analyse différents (CSR, JPL, GFZ et GRGS) et du modèle hydrologique HYDL. Nous avons évalué au cours de la thèse ces différents modèles afin de corriger les déformations de charge hydrologique des 18 stations GNSS existantes dans le bassin Amazonien. L'utilisation des données de règles nivelées et de profils en long des fleuves, ont pu être comparées aux données de niveau d'eau par altimétrie spatiale dans des travaux de validation des satellites Jason-2, ENVISAT et ICESAT.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Antecedentes, histórico e justificativa	5
1.3 Objetivo	8
1.4 Contribuições originais da tese	10
1.5 Síntese da abordagem metodológica	11
1.6 Área de estudo	13
1.7 Estrutura da tese	15
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1 Redes de referência	18
2.1.1 Redes de referência adotadas no estudo	24
2.1.2 Referências Verticais	25
2.1.2.1 Modelos do geopotencial	27
2.1.3 Modelos de correção	33
2.1.3.1 Movimento das placas tectônicas	34
2.1.3.2 Maré terrestre	34
2.1.3.3 Maré polar	35
2.1.3.4 Efeitos de cargas	36
2.1.3.4.1 Carga atmosférica	37
2.1.3.4.2 Carga oceânica das marés	39
2.1.3.4.3 Efeitos de carga causados por fenômenos hidrológicos	40
2.2 Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS)	43
2.2.1 GPS	44
2.2.2 GLONASS	47
2.2.3 Erros e efeitos envolvidos nas observações	48
2.2.3.1 Erro de órbita do satélite	48
2.2.3.2 Erros de relógio do satélite e receptor	49
2.2.3.3 Centros de fase das antenas GNSS	50
2.2.3.4 Refração Ionosférica	51
2.2.3.5 Refração Troposférica	52
2.2.3.6 Perda de ciclos	53

2.2.3.7 Multicaminho	53
2.2.4 Estações permanentes GNSS	54
2.2.4.1 Rede IGS (Serviço Internacional GNSS)	54
2.2.4.2 RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo)	55
2.2.4.3 Estações permanentes instaladas no âmbito do projeto Dinâmica Fluvial	57
2.3 GRACE (<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>)	59
2.4 Altimetria Espacial	63
2.4.1 Estação Virtual	67
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	71
3.1 Definição da estratégia de processamento	73
3.1.1 Método IPPP (PPP inteiro)	76
3.1.2 Código computacional GINS para processamento de dados GPS	79
3.1.1.1 Treinamento e instalação do código computacional GINS	82
3.1.2 Dados utilizados	83
3.1.3 Procedimento de análise dos métodos de processamento	84
3.1.4 Resultado da avaliação do PPP	87
3.2 Correção da carga hidrológica	93
3.2.1 Dado GPS	96
3.2.2 Dados GRACE	96
3.2.3 Dados HYDL	98
3.2.4 Avaliação dos modelos de correção de carga hidrológica	98
CAPÍTULO 4 – BACIA AMAZÔNICA	113
4.1 Campanhas de campo realizadas no âmbito da tese	124
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS	129
5.1 Obtenção de altitudes dos zeros das réguas linimétricas	130
5.1.1 Comparação da altitude do zero das réguas encontrados em outros estudos	151
5.1.2 Altitude do zero da régua em função dos efeitos de carga hidrológica	153
5.2 Perfis longitudinais dos rios Amazônicos	160
5.3 Análise de dados de Altimetria Espacial	174
5.3.1 Perfis de altimetria espacial	183

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	192
6.1 Considerações finais	192
6.2 Conclusões	195
6.3 Recomendações	199
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	203
ANEXO A	218
RÉSUMÉ ÉTENDU	218
ANEXO B	223
ARTIGO: <i>Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin</i>	223

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

- Figura 1.1 – Área de estudo, com identificação das estações GNSS utilizadas e das estações da Rede Hidrometeorológica Nacional 15

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- Figura 2.1 - Estações e suas técnicas utilizadas na realização do ITRF2005 (Fonte: ALTAMINI, 2009) 23
- Figura 2.2 - Grandezas envolvidas nos referenciais altimétricos (Fonte: FREITAS e BLITZKOW, 1999) 27
- Figura 2.3 - Ondulação Geoidal (Fonte: Modelo MAPGEO2010) 28
- Figura 2.4 - Modelo do geopotencial EGM08 e sua ondulação geoidal (em metros) na área de estudo do trabalho 30
- Figura 2.5 - Diferenças entre a ondulação geoidal (em metros) dos modelos EIGEN6c4 e EGM08 na área de estudo do trabalho 32
- Figura 2.6 - Amplitude máxima de deformação crustal causada por contribuição de variação de pressão atmosférica com séries mensais do ECMWF de 2000 a 2015 38
- Figura 2.7 - Carta global da amplitude da maré M2 e de seu efeito de carga oceânica em centímetros (Fonte: LEGOS apud PEROSANZ, 2006) 40
- Figura 2.8 - Deformação vertical causada por carga hidrológica (Fonte: VAN DAM et al., 2001) 41
- Figura 2.9 - Movimentos verticais nas estações GNSS da bacia Amazônica causadas por carga hidrológica e detectadas na presente tese 42
- Figura 2.10 - Estações GNSS da Rede IGS (Fonte:DOW et al., 2009) 55
- Figura 2.11- Distribuição das estações da RBMC (Fonte: endereço eletrônico do IBGE em www.ibge.gov.br) 56
- Figura 2.12 - Estações GNSS instaladas pela CPRM no âmbito do projeto de pesquisa Dinâmica Fluvial 57
- Figura 2.13 - Estação permanente GPS de URUK na cidade de Urucurituba, nas margens do rio Madeira 58
- Figura 2.14 - Distribuição espaço-temporal das médias mensais do 61

primeiro semestre a partir de 10 anos de dados do satélite GRACE	
Figura 2.15 - Distribuição espaço-temporal das médias mensais do segundo semestre a partir de 10 anos de dados do satélite GRACE	62
Figura 2.16 - 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 Landsat5-TM com composição das bandas 7, 4 e 2	64
Figura 2.17 - Processo de aquisição do dado de altimetria espacial (Fonte: ROSMORDUC, 2009; adaptado pelo autor para o português)	65
Figura 2.18 - Seleção de dados de altimetria espacial para criação da estação virtual em imagem Landsat5-TM com composição das bandas 7, 4 e 2	67
Figura 2.19 - Dados coletados pelo satélite Envisat - cada série representa uma passagem do satélite	68
Figura 2.20 - Dados selecionados da série temporal da estação virtual de Iracema- AM (Fonte: SILVA, 2010)	69
Figura 2.21 - Dados do satélite altímetro Jason-2 na estação de Manaus	70
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	
Figura 3.1 – Fluxograma metodológico da tese	72
Figura 3.2 - Distribuição espacial das estações GNSS e regiões de influência (buffers) de distâncias das estações GNSS para as réguas e locais de levantamentos geodésicos realizados na bacia Amazônica	74
Figura 3.3 - Fluxograma da metodologia do procedimento de estimativa de ambigüidades inteiras do código computacional GINS	76
Figura 3.4 - Variáveis observáveis do GPS e suas componentes	77
Figura 3.5 - Contribuição do GINS para o CRC (Fonte: PEROSANZ <i>et al.</i> , 2008, adaptado pelo autor para português)	81
Figura 3.6 - Esquema de envio de dados pelo usuário e pelo servidor do GINS (Fonte: BIANCALE <i>et al.</i> , 2008, adaptado pelo autor para português)	83
Figura 3.7 - Comparação entre os métodos DD e DPPP para o processamento GPS em diferentes linhas de base	89
Figura 3.8 - Comparação do desvio padrão em metros obtido na coordenada vertical entre as diferentes estratégias de processamento do	90

método PPP

Figura 3.9 - Valores de altura elipsoidal para a estação NAUS utilizando diferentes estratégias de processamento PPP em diferentes datas	91
Figura 3.10 Valores de altura elipsoidal para a estação POVE utilizando diferentes estratégias de processamento PPP em diferentes datas	92
Figura 3.11 Valores de altura elipsoidal para a estação NAUS utilizando diferentes estratégias de processamento PPP em diferentes datas	92
Figura 3.12 - Dados de deformação crustal derivados do GRACE (a) e do HYDL (b) em sua amplitude vertical máxima (cm). Baseado nas séries de 2005-2010 do GRACE (GRGS) e séries HYDL. Os pontos pretos indicam as estações GPS permanentes utilizadas neste estudo	95
Figura 3.13 Deformação crustal obtida pela estação GPS de AMCO, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	99
Figura 3.14 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de APSA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	99
Figura 3.15 Deformação crustal obtida pela estação GPS de BELE, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	100
Figura 3.16 Deformação crustal obtida pela estação GPS de BOAV, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	100
Figura 3.17 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de BRAZ, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	101
Figura 3.18 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de MABA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	101
Figura 3.19 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de MAPA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	102
Figura 3.20 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de MTSR,	102

derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	
Figura 3.21 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de NAUS, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	103
Figura 3.22 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de PAAT, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	103
Figura 3.23 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de PAIT, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	104
Figura 3.24 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de POVE, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	104
Figura 3.25 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de RIOB, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	105
Figura 3.26 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de ROCD, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	105
Figura 3.27 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de ROGM, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	106
Figura 3.28 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de ROJI, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	106
Figura 3.29 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de SAGA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	107
Figura 3.30 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de Uruk, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL	107
Figura 3.31 – Correlação de dados entre GPS e GRACE(a) , GPS e	109

HYDL(b) e porcentagem de correção dos efeitos de deformação crustal em estações GPS por séries do GRACE (c) e HYDL(d)	
Figura 3.32 – Fator de escala entre as séries de estações GPS e séries do GRACE (a) e HYDL (b)	110
Figura 3.33 – Diferença de fase em dias das séries de estações GPS e séries do GRACE (a) e HYDL (b)	110
Figura 3.34 – Tendência em milímetros/ano da variação vertical da crosta devido a carga hidrológica avaliadas pelas séries do GRACE (GRGS) 2003-2014	112
CAPÍTULO 4 – BACIA AMAZÔNICA	113
Figura 4.1 – Bacia Amazônica, principais sub-bacias e países componentes	113
Figura 4.2 – Pontos de monitoramento da rede hidrometeorológica nacional (Fonte: ANA – endereço eletrônico acessado em 10/04/2016).	117
Figura 4.3 – Valores de precipitação total anual média em milímetros estimadas pela missão espacial TRMM para os anos de 2001-2014	119
Figura 4.4 – Valores de precipitação total anual média em milímetros para a bacia Amazônica e suas principais sub-bacias estimadas pela missão espacial TRMM para os anos de 2001-2014	120
Figura 4.5- Foto da cheia máxima registrada no porto de Manaus (Créditos SUREG-MA)	121
Figura 4.6 - Foto da vazante máxima registrada no porto de Manaus (Créditos SUREG-MA)	121
Figura 4.7 – Valores de altitudes derivados do modelo digital de elevação (MDE) SRTM	123
Figura 4.8 – Embarcação típica da Amazônia, que fornece o suporte para a realização da maioria das campanhas de campo de visita às estações hidrometeorológicas da região	125
Figura 4.9 - Perfis longitudinais dos principais rios amazônicos em território brasileiro, levantados a partir do uso de receptores GPS	126
Figura 4.10 - As dezesseis campanhas de campo realizadas no âmbito do presente estudo em relação a variação da cota registrada no Porto de Manaus.	128

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

Figura 5.1 - Ocupação de um lance de régua por receptor GPS para obtenção de altitude da estação fluviométrica de Porto União (rio Amazonas)	131
Figura 5.2- Referência de nível (RN) utilizada para nivelamento geométrico das réguas linimétricas, com referência arbitrária	132
Figura 5.3 - Instalação de receptores e antenas GPS no barco	134
Figura 5.4 - Exemplo das estações utilizadas em dupla diferença para obtenção da diferença de altura entre a antena do receptor GPS do barco e a superfície da água	136
Figura 5.5 - Exemplo de nivelamento geométrico das alturas da antena do barco	137
Figura 5.6 – Estações fluviométricas cuja altitude do zero da régua foi obtida a partir de receptores GPS durante a realização do presente estudo.	139
Figura 5.7 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Madeira.	145
Figura 5.8 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Negro.	145
Figura 5.9 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Solimões.	146
Figura 5.10 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Amazonas.	146
Figura 5.11 – Diferença entre os valores das leituras das réguas das estações de Jatuarana e Careiro com base no banco de dados HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA)	148
Figura 5.12 - Altitude (em metros) do zero da régua medido (pontos vermelhos) nas passagens do barco em Tefé e registros de níveis de água falhos que resultam em erros na obtenção da altitude do zero da régua	149

Figura 5.13 – Instabilidade dos lances de régua encontrados na bacia Amazônica	151
Figura 5.14 - Série de dados geodésicos e da régua linimétrica em Urucurituba – eixo à esquerda: deformação radial crustal (em metros) (GPS e GRACE); eixo à direita: nível de água (em metros) (régua e altímetro JASON-2)	154
Figura 5.15 - Série de dados geodésicos e da régua linimétrica em Porto Velho - eixo à esquerda: deformação radial crustal (em metros) (GPS e GRACE); eixo à direita: nível de água (em metros) (régua e altímetro JASON-2)	155
Figura 5.16 - Perfil longitudinal dos rios Madeira e Amazonas a partir de dados médios mensais (2001-2009) de nível de água das réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros)	160
Figura 5.17 - Perfil longitudinal dos rios Solimões e Amazonas a partir de dados médios mensais (2001-2009) de nível de água de réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros)	161
Figura 5.18 - Perfil longitudinal dos rios Negro e Amazonas a partir de dados médios mensais (2001-2009) de nível de água de réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros)	161
Figura 5.19 - Perfil de declividades da linha de água dos rios Madeira e Amazonas obtidos a partir de dados das diferenças de altitude dos níveis de água e distância de réguas (2001-2009)	162
Figura 5.20 - Perfil de declividades da linha de água dos rios Solimões e Amazonas obtidos a partir de dados das diferenças de altitude dos níveis de água e distância de réguas (2001-2009)	163
Figura 5.21 - Perfil de declividades de linha de água dos rios Negro e Amazonas obtidos a partir de dados das diferenças de altitude dos níveis de água e distância de réguas (2001-2009)	163
Figura 5.22 - Problema da mudança de referencial arbitrário nos dados da estação de Itacoatiara	164
Figura 5.23 – Perfil de declividade dos rios Madeira e Amazonas e os diferentes filtros espaciais aplicados	168
Figura 5.24 - Variações de declividade para diferentes modelos do	169

geopotencial aplicados a um mesmo perfil observado	
Figura 5.25 - Perfis longitudinais coletados a partir de receptores GNSS instalados a bordo de embarcações em campanhas fluviais realizadas nos rios Madeira e Amazonas	170
Figura 5.26- Perfis longitudinais coletados a partir de receptores GNSS instalados a bordo de embarcações em campanhas fluviais realizadas nos rios Solimões e Amazonas	170
Figura 5.27- Perfis longitudinais coletados a partir de receptores GNSS instalados a bordo de embarcações em campanhas fluviais realizadas nos rios Negro e Amazonas	171
Figura 5.28 - Perfis de declividade dos rios Madeira e Amazonas, gerado a partir dos dados de perfis longitudinais obtidos por receptores GNSS.	172
Figura 5.29 - Perfis de declividade dos rios Solimões e Amazonas, gerado a partir dos dados de perfis longitudinais obtidos por receptores GNSS	172
Figura 5.30 - Perfis de declividade dos rios Negro e Amazonas, gerado a partir dos dados de perfis longitudinais obtidos por receptores GNSS.	173
Figura 5.31 - Diferença na escala espacial de perfis de declividade obtidos entre réguas fluviométricas (gauge) e do perfil de declividade GPS na escala de 25 km de resolução	174
Figura 5.32 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluviométrica de Anamã	181
Figura 5.33 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluviométrica de Manaus	181
Figura 5.34 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluviométrica de Codajás	182
Figura 5.35 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluviométrica de Itapéua	182
Figura 5.36 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite ENVISAT nos rios Solimões e Amazonas.	185
Figura 5.37 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite ENVISAT nos rios Madeira e Amazonas	185
Figura 5.38 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações	186

virtuais do satélite ENVISAT nos rios Negro e Amazonas	
Figura 5.39- Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite JASON-2 nos rios Solimões e Amazonas	186
Figura 5.40 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite JASON-2 nos rios Madeira e Amazonas	187
Figura 5.41- Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite JASON-2 nos rios Negro e Amazonas	187
Figura 5.42- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Solimões e Amazonas	188
Figura 5.43- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Madeira e Amazonas	189
Figura 5.44- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Negro e Amazonas	189
Figura 5.45- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite ENVISAT nos rios Solimões e Amazonas	190
Figura 5.46- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Madeira e Amazonas	190
Figura 5.47 - Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite ENVISAT nos rios Negro e Amazonas	191

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Tabela 2.1 - Técnicas utilizadas na construção do ITRF (Fonte: ALTAMINI, 2009)	23
--	----

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Tabela 3.1 – Precisão da posição em milímetros estimada do método PPP para as diferentes estratégias de processamento	91
Tabela 3.2 - Resultados das comparações GNSS com as séries do GRACE (GRGS, CSR, JPL e GFZ) e do HYDL	108

CAPÍTULO 4 – BACIA AMAZÔNICA

Tabela 4.1 – Campanhas de campo realizadas de 2009 a 2014, as quais forneceram dados para obtenção de perfis longitudinais e nivelamento de réguas	115
Tabela 4.2 – Campanhas de campo realizadas de 2009 a 2014, que forneceram dados para obtenção de perfis longitudinais e obtenção da altitude do zero de réguas	127

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

Tabela 5.1 – Valores de altitude do zero das réguas definidos apenas por pontos fixos adquiridos pela ocupação direta de estações fluviométricas por receptores GPS	140
Tabela 5.2 – Valores de altitude do zero de réguas linimétricas obtidos por pontos fixos (zero fixo) em contraste com valores do zero definidos a partir de dados cinemáticos adquiridos pela passagem de receptores GPS a bordo de barcos pela estação fluviométrica	142
Tabela 5.3 – Altitude do zeros das réguas de estações fluviométricas obtida apenas por passagem de antenas de receptores GNSS a bordo de barcos	144
Tabela 5.4 - Diferenças de altitude do zero de réguas linimétricas encontradas entre o presente estudo e o estudo de KOSUTH et al. (2006)	151
Tabela 5.5 - Correlação entre dados geodésicos e régua linimétrica em Urucurituba	153

Tabela 5.6 - Correlação entre dados geodésicos e régua linimétrica em Porto Velho	156
Tabela 5.7 - Proposta de valores dinâmicos para a altitude do zero das estações fluviométricas	158
Tabela 5.8 - Avaliação das altitudes do zero de réguas fluviométricas obtida pelo satélite ICESAT (Hall et al., 2011) em relação dos valores obtidos por receptores GNSS alcançados nesta tese	176
Tabela 5.9 - Estatística das passagens analisadas do satélite ICESAT	178
Tabela 5.10 - Diferença (em metros) entre as altitudes das estações fluviométricas referenciadas ao geóide através do modelo do geopotencial EGM08 obtidas pelo satélite ICESAT e aquelas obtidas mediante ocupações por receptores GPS	180
Tabela 5.12 – Comparação entre o estudo de Hall et al. (2011) e o estudo realizado nesta tese para aplicação de dados do satélite ICESAT	183

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O presente estudo tem, como principal motivação, uso fundamentado de novas tecnologias de sensoriamento remoto buscando a avaliação e o aprimoramento de tecnologias mediante suporte geodésico, com potencial de aplicação ampla e disseminada para a condução de estudos hidrológicos de monitoramento e modelagem de recursos hídricos e meio ambiente.

Nas últimas décadas, dezenas de missões espaciais foram realizadas com o objetivo de colocar, na órbita terrestre, satélites para observação do nosso planeta, como, por exemplo, o TOPEX (*Topography Experiment*), JASON-2 (*Joint Altimetry Satellite Oceanography Network-2*), ERS-2 (*European Remote Sensing-2*), ENVISAT (*Environmental Satellite*), ICESAT (*The Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite*) e GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*). Apesar da grande maioria das missões espaciais não apresentarem como prioridade a obtenção de variáveis hidrológicas, diversos estudos e pesquisas apresentaram, com sucesso, aplicações de dados de sensores desses satélites em recursos hídricos, como pode ser visto em CAMPOS (2004), GETIRANA (2009), ALMEIDA FILHO (2009), SILVA (2010) e XAVIER (2012), entre outras referências.

Sob a ponto de vista de aplicações hidrológicas, destacam-se sobretudo as missões com fundamentos em princípios geodésicos. A geodésia pode ser compreendida, de forma singela, como a ciência que estuda a forma, dimensões e o movimento de rotação da Terra, com identificação da localização de objetos em sua superfície e do campo gravitacional terrestre, além da variação dessas características no decorrer do tempo e ao longo do espaço. BLITZKOW *et al.* (2011) ressalta que, no passado, era costume dividir a geodésia em física, geométrica e espacial. No entanto essa segmentação perdeu a finalidade nos tempos atuais, a se considerar que com o avanço da era espacial na qual as metodologias aplicadas acabam envolvendo atividades pertinentes às três áreas anteriormente separadas da geodésia. A tendência atual, segundo BLITZKOW *et al.* (2011), é de identificar três (3) objetos distintos de interesse da geodésia a saber: (1) geometria e as deformações da Terra; (2) parâmetros de

orientação do planeta no espaço; (3) o campo gravitacional envolvendo o geóide. BLITZKOW *et al.* (2011) também destaca que a geodésia não pode ser compreendida e limitada por simples matemática aplicada e dedicada exclusivamente a um processo de observações. Compreende-se que, nos dias atuais, a geodésia está envolvida diretamente em atividades de diversos ramos de outras ciências, principalmente a partir do uso de sistemas de navegação global por satélites (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) a se destacar a aplicação de conceitos de geodésia em estudos que envolvem a meteorologia, sismologia, geofísica, entre outras atividades de geociências e engenharia.

Sob a ponto de vista de aplicações hidrológicas, destacam-se, sobretudo as missões com fundamentos em princípios geodésicos.

Nesta tese, aplica-se a geodésia com base no emprego de conceitos e de técnicas diversas associadas mais estreitamente com o uso de dados adquiridos por meio de sensoriamento remoto. Concentra-se especial atenção na aplicação de dados de natureza espacial em consonância com estudos de suporte ao monitoramento e à modelagem hidrológica e por extensão à avaliação da evolução ambiental do sistema físico terrestre na escala planetária.

Em especial, busca-se situar e firmar novo cenário de informações de natureza espaço-temporal com possibilidade de emprego na área de hidrometria, onde se pode, a partir de dados geodésicos, com o aporte de medições *in situ*, ou mediante dados de sensores localizados em plataformas orbitais, por complementaridade e associação, suprir a carência ou limitação de dados hidrológicos básicos, principalmente de nível de água dos rios, lagos e áreas úmidas.

Espera-se, assim, melhora da correspondente qualidade, custos associados e tempo de obtenção dessas informações, conforme programa proposto pela *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS) para a década 2003-2013, denominado de PUB (*Prediction in Ungaged Basins*), segundo dois eixos principais:

- proposição de métodos e modelos para captar a variabilidade espaço-temporal de processos hidrológicos com vistas a predições e previsões em bacias não monitoradas;
- observação, monitoramento e caracterização do valor dos dados para predições e previsões hidrológicas, de forma a estimular e orientar a geração de novas informações para quantificação das incertezas e riscos na predição e previsão de

variáveis hidrometeorológicas e de estados de sistemas hídricos na escala da bacia hidrográfica.

Extensão relativamente recente foi proposta pela IAHS, que promoveu reunião em Delft, Holanda (23 e 24 de outubro de 2012), com vistas a estabelecer as bases de uma nova década (2013-2023) para a hidrologia segundo as diretrizes do PUB, consoante as seguintes temáticas: classificação de bacias; identificabilidade da heterogeneidade de processos; análise de incertezas e diagnósticos de modelos; novas abordagens para coleta de dados e ganho de informação; nova teoria hidrológica; novas abordagens para modelagem.

Adicionalmente, referenciais científico-tecnológicos e metodológicos são concebidos periodicamente para incentivar o desenvolvimento no que se convencionou designar por décadas hidrológicas. Esse conceito pode ser encontrado, notadamente, em proposições formuladas pela *United Nations Educational, Scientific and Cultural* (UNESCO) (1972, 1974 a-e) e por alguns trabalhos publicados, como, por exemplo, ENTEKHABI (1999), WOOD *et al.* (2011), BEVEN e CLOKE (2012) and WOOD *et al.* (2012). Adicionalmente, prospecta-se o futuro da ciência hidrológica em artigos como os de KLEMES (1974), KLEMES (1983, 1986), LINSLEY (1986), PILGRIM (1986), SPOSITO (1986), BRUTSAERT (1986), DOOGE (1986), DAWDY (1986) e VANONI (1986), BURGESS (1986), EAGLESON (1986), EAGLESON (1997), DOODGE (1997), RODRIGUEZ-ITURBE (1997), KLEMES (1997), entre outros. Nesse sentido, permite-se situar o presente trabalho de pesquisa no estado da arte no que concerne ao desenvolvimento de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas de escalas diversas, em sua maioria, com ausência ou precário monitoramento, evidenciando a possibilidade e abrangência de realização de estudos de regiões que transcendem os limites de uma bacia hidrográfica podendo alcançar a escala planetária.

Enfoque especial é dedicado, nesta tese, aos estudos integrados geodésico-hidrológicos na bacia Amazônica de forma a oferecer suporte em estudos de balanço hídrico e de energia para uma área de aproximadamente 6.000.000 km² com base em diferentes conjuntos de dados, notadamente, medidas locais de níveis de água e medidas GPS coletadas em variadas campanhas de campo conduzidas ao longo dos rios amazônicos ao longo dos últimos oito (8) anos pelo autor, mais precisamente desde 2008, conjuntamente com mensurações adquiridas por missões espaciais, no caso

particular da região Amazônica, com diversas áreas de difícil acesso e pouco ou não monitoradas.

A altimetria por radar, por exemplo, é uma técnica, em essência, de natureza geodésica, que, por meio do uso de radares altímetros em plataformas orbitais, permite, há mais de 30 anos, o monitoramento dos oceanos, passando, também, a ser aplicada, nos últimos 20 anos, no estudo de águas continentais (CALMAN e SEYLER, 2006). Em especial, a Amazônia é uma região de adequado potencial para as aplicações de altimetria por satélites (GETIRANA, 2009; SILVA, 2010; SILVA, 2010; MOREIRA, 2010; PAIVA, 2013), em virtude de seus largos e extensos rios possibilitarem grandes faixas de aquisição de dados fluviométricos via sensoriamento remoto. Nesta tese, sensores altimétricos instalados nas missões JASON-2, ENVISAT e ICESAT foram empregados.

A missão espacial GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), por sua vez, permitiu modelar as variações do campo gravitacional terrestre, com oscilações que, na maioria das regiões continentais, são causadas pelo ciclo hidrológico. O uso dos dados do GRACE apresenta bons resultados em termos de estimativa do comportamento sazonal e inter-anual do armazenamento de água total em grandes bacias, como mostrado, para a bacia Amazônica, em XAVIER (2012), mostrando-se uma promissora fonte de informação hidrológica na grande escala. Os dados do satélite GRACE, também, podem ser utilizados em abordagens úteis no monitoramento das variações verticais da crosta terrestre e auxiliam, dessa forma, a correção dessas variações em levantamentos geodésicos. Dados de quatro (4) centros de produção de séries de modelagem do campo gravitacional da Terra, expressas em coeficientes do desenvolvimento em séries de funções harmônicas esféricas do potencial gravitacional normalizados, foram empregados e avaliados, a saber: CSR, JPL, GFZ e GRGS.

Sob o ponto de vista hidrológico, por exemplo, a determinação dos volumes totais de água em uma região (*Terrestrial Water Storage – TWS*), por meio de dados da missão GRACE, adquiridos em escalas de resolução espacial de 400 km e de resolução temporal de 1 mês, corresponde a um conjunto independente de dados de altura equivalente de água com o propósito de efetuar procedimento complementar de calibração e de validação de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, operação que é, geralmente, realizada a partir de dados de precipitação, evaporação potencial e vazão. Com a base de dados GRACE,

pode-se prospectar sobre a representatividade espaço-temporal de volumes armazenados de água em uma bacia hidrográfica, associando-se esses aspectos com o balanço hídrico e a natureza dos escoamentos superficiais e subterrâneos associados, na escala da bacia, com os processos físicos de chuva e evaporação.

Complementarmente, sistemas de navegação global por satélites (GNSS), entre os quais se destaca o conhecido sistema GPS (Sistema de Posicionamento Global - *Global Positioning System*), podem ter seus sinais utilizados para obtenção de diversas variáveis hidrológicas, meteorológicas e ambientais bem como componentes do ciclo hidrológico (BEVIS *et al.*, 1992; BEVIS *et al.*, 2005; LARSON *et al.*, 2008; MOREIRA *et al.*, 2016). Por meio de levantamentos em campo, é possível acessar informações hidrológicas importantes como perfil longitudinal de rios e obter o posicionamento de estações hidrométricas em relação a uma mesma referência altimétrica, conforme apresentado no trabalho de MOREIRA (2010).

Nessa perspectiva, a presente tese representa um esforço de integração de diferentes bases de dados, muitas delas geradas de forma inédita no âmbito desta pesquisa, adotando-se referenciais geodésicos apropriados e especialmente técnicas avançadas de processamento de dados geodésicos para prover uma melhor estimativa de níveis de água e correspondentes declividades das linhas piezométricas e de energia ao longo de diferentes trechos de rios na bacia amazônica. Procedimentos de calibração e validação são extensivamente conduzidos na pesquisa.

1.2 Antecedentes, histórico e justificativa

A discussão sobre aplicabilidade dos dados geodésicos na bacia Amazônica, área escolhida como estudo de caso desta tese, requer, em um primeiro momento, oferecer uma visão histórica de alguns trabalhos anteriores na região, mais estreitamente relacionados ao presente trabalho de pesquisa, com destaque, por exemplo, para CAMPOS *et al.* (2001), BIRKETT *et al.* (2002), LEON *et al.* (2006), CALMANT e SEYLER (2006), GETIRANA *et al.* (2009), XAVIER *et al.* (2010) e SILVA *et al.* (2012), entre outros.

Registra-se, ainda, a aplicação pioneira de dados de geodésia na bacia Amazônica a partir de teses de doutorado de GETIRANA (2009), SILVA (2010) e XAVIER (2012) e de dissertações de mestrado de MOREIRA (2010) e SILVA (2010),

desenvolvidas no âmbito do intercâmbio técnico-científico entre o Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e a Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Esses estudos anteriormente realizados tratam da aplicação de dados geodésicos e exploram o emprego de técnicas de avaliação da qualidade desses dados em hidrologia por meio de modelagem de balanço hídrico, de comparação da variação de dados de cotas fluviométricas obtidas por estações *in situ*. Em adição, examinam-se dados de satélites altimétricos e, contrastam-se dados gravimétricos e dados de chuva por satélite, permitindo compará-los e aplicá-los na análise de volumes de precipitação, evaporação, armazenamento e escoamento superficial e subterrâneo mediante emprego de modelos do tipo chuva-vazão em bacias hidrográficas diversas, entre outras análises.

Devido ao grande sucesso de aplicações de conceitos geodésicos na ciência hidrológica perante a comunidade internacional, reconheceu-se recentemente, então, adoção da terminologia hidrogeodésia para identificar o campo de conhecimento que abrange a aplicação de técnicas geodésicas no estudo e monitoramento hídrico da superfície terrestre continental. Como destaque, faz-se referência ao projeto apresentado ao IGP (*International Geoscience Programme*), em 2008, chamado *Geodetic Monitoring of the Global Water Cycle* (disponível em www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/IGCP565_AR-2012.pdf). Nesse sentido, é importante compreender que a hidrogeodésia é um ramo interdisciplinar, e muitos de seus produtos são de difícil utilização, pois demandam um conhecimento sólido de geodésia para sua correta aplicação em hidrologia.

A pauta inicial de discussão dos tópicos abrangidos pela hidrogeodésia visam compreender as limitações e as potencialidades de sensores geodésicos para aplicações hidrológicas. O sucesso dessas aplicações permitirá que, no futuro, missões geodésicas dedicadas exclusivamente à hidrologia sejam propostas, pois, no estágio atual, muitas dessas técnicas não possuem resolução espacial, resolução temporal ou precisão necessária para atender grande parte das demandas em hidrologia, notadamente bacias hidrográficas de menor porte, que constituem um conjunto significativo de regiões não apropriadamente monitoradas. Em adição, é necessário discutir dados observáveis obtidos por esses sensores, incluindo informações geométricas, como altura e volume de corpos de água, que devem ter os correspondentes significados físicos depreendidos para a correta aplicação em hidrologia, bem como processar e converter informações de

variações gravimétricas para variações de massa ocasionadas por alterações no ciclo hidrológico.

Segundo essa diretriz de formulação do eixo de pesquisa da hidrogeodésia, que abrange o escopo desta tese, aprecia-se que a principal justificativa do desenvolvimento do presente estudo com enfoque em novas tecnologias voltadas ao monitoramento hidrológico é baseada na limitação severa da quantidade e da qualidade dos dados hidrológicos gerados pelo monitoramento convencional, sem deixar de mencionar o associado custo elevado necessário para operação, coleta e disponibilização desses dados.

No caso do Brasil, a rede hidrometeorológica nacional, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), dispõe, no momento, de 1.852 estações fluviométricas cadastradas no banco de dados HidroWeb, acessível pelo endereço eletrônico <http://hidroweb.ana.gov.br>. Apesar da quantidade aparentemente significativa de estações fluviométricas, o país ainda carece bastante de informação hidrológica básica, fato explicado em função de que, atualmente, a rede brasileira apresenta densidade de estações quatro vezes menor 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 km². O Brasil possui uma estação a cada 4669 km², mas com uma má distribuição geográfica. Por exemplo, a bacia Amazônica ocupa 44% do território brasileiro e possui, em contrapartida, apenas 14% (273) 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 dos rios amazônicos.

A possibilidade de integração entre dados convencionais e dados oriundos de novas tecnologias, como os de geodésia, para o Brasil, representa a possibilidade de melhorar o conhecimento hidrológico a baixo custo, devido ao fato de que a maioria desses dados são fornecidos gratuitamente por agências internacionais.

No entanto, conforme salienta XAVIER (2012), é necessário discutir os usos e incertezas desses mesmos dados, pois o uso indiscriminado de novas tecnologias pode aumentar o grau de incertezas na estimativa de variáveis hidrológicas, caso esses dados sejam utilizados de forma incorreta. O usuário deve estar ciente que os erros e as limitações desses dados, principalmente provenientes da precisão e de escalas espaciais e temporais adotadas para a aquisição, propagar-se-ão para as análises a serem realizadas, e a falta de conhecimento dessas incertezas certamente refletir-se-á na capacidade de se transformar os dados em informações confiáveis.

Diante desse cenário, o presente trabalho visa contribuir com base na geração de informações altimétricas, com suporte de procedimento metodológico, que, mais adiante, será apresentado em detalhes (Capítulo 3), a partir de receptores GNSS, com precisão centimétrica, que possibilitaram avaliar e melhorar a qualidade da informação dos dados de cotas fluviométricas até então obtidas por estações convencionais e satélites orbitais, conforme exposto no capítulo de resultados.

Na seqüência do texto, com base nas considerações de motivação e de histórico de trabalhos antecedentes previamente e sucintamente apresentados, desenvolvidos com enfoque na área de hidrogeodésia para a bacia Amazônica, delimita-se o escopo da presente pesquisa, apresentando-se a questão científica do trabalho sustentada no objetivo geral e as correspondentes metas traduzidas em objetivos específicos desta tese.

1.3 Objetivo

Como exposto na seção precedente, o presente estudo fundamenta-se na motivação de utilização de dados geodésicos de forma a melhorar a qualidade e a quantidade de dados hidrológicos disponíveis na bacia Amazônica.

Enfatiza-se que esta tese foi concebida para dar continuidade e produzir novos avanços ao trabalho apresentado por MOREIRA (2010), baseado na possibilidade do uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) prover informações

altimétricas no nível centimétrico de precisão, condição essa que permite uma melhor avaliação de outras técnicas de geodésia a exemplo da altimetria espacial.

Nesse sentido, a tese propõe, como objetivo geral, a obtenção de altitudes ortométricas do zero das réguas da rede de estações fluviométricas na região amazônica. Essa obtenção de altitude ortométricas é feita, de forma aproximada, usando receptores GPS geodésicos e com aplicação do modelo do geopotencial EGM08, o que possibilita uma referência altimétrica comum no que concerne aos níveis de água obtidos por essas réguas, permitindo obter os perfis de linha de água dos principais rios amazônicos e fornecer subsídios para modelagem do balanço hídrico e de energia em uma escala que não fora atingida ou abordada por qualquer estudo anterior aplicado à bacia Amazônica, como pode ser verificado e constatado na atual literatura técnico-científica nacional ou internacional existente e disponível em função do grande desafio ora explicitado.

A questão científica da pesquisa, que está subjacente a essa proposição, pode ser melhor dissecada por meio do exame cuidadoso de três objetivos específicos bem delineados, discriminados a seguir:

- estudo dos movimentos verticais, causados por carga hidrológica, sendo esses deslocamentos avaliados a partir de séries geradas pelo satélite GRACE, de modelagem hidrológica e de estações permanentes GNSS, que, em particular, auxiliarão na correção dos levantamentos geodésicos realizados;
- avaliação dos dados obtidos a partir de receptores GNSS, instalados a bordo de embarcações nos levantamentos de campo, para a elaboração de perfis longitudinais dos grandes rios amazônicos e utilização desses dados na tarefa de obtenção da altitude ortométrica do zero das réguas linimétricas de forma rigorosa e eficiente;
- comparação dos dados obtidos por receptores GNSS e réguas linimétricas referenciadas com dados de outras técnicas geodésicas, em particular no que concerne ao uso da altimetria espacial com satélites ICESAT, ENVISAT e JASON-2.

1.4 Contribuições originais da tese

Destaca-se, nesta seção, as contribuições originais essenciais do trabalho, com detalhamento feito por cada um dos três objetivos específicos expostos no item 1.2, que poderão ser estendidas, de forma mais abrangente, na exposição do capítulo final desta tese, onde são abordadas as conclusões e recomendações da pesquisa.

Em relação ao primeiro objetivo específico, sinteticamente expresso por estudos dos movimentos verticais da crosta terrestre, apresenta-se uma contribuição original sobre a resposta elástica da crosta terrestre face à carga hidrológica na bacia amazônica, constituindo-se um avanço em relação à literatura científica produzida até o momento, podendo-se, neste caso, citar, para referência, o artigo produzido por Michael Steckler (STECKLER *et al.*, 2010), em que aborda o efeito de cargas hidrológicas em Bangladesh. Os trabalhos publicados, que utilizaram dados de geodésia na bacia amazônica, em sua grande maioria, ignoram esse tipo de fenômeno, tendo sido possível, como será mostrado no texto, discriminar, entre os procedimentos e produtos disponíveis, o mais apropriado para remoção dos efeitos de carga hidrológica nessa região.

Quanto ao segundo objetivo específico da tese, ou seja, de obter a representação dos perfis longitudinais dos rios amazônicos e posterior obtenção da altitude ortométrica do zero das réguas a partir do emprego de dados oriundos de receptores GNSS instalados em embarcações, diversas contribuições importantes podem ser evidenciadas e identificadas *a priori*. Em relação à literatura internacional publicada e em relação ao conjunto de trabalhos acadêmicos registrados em teses e dissertações desenvolvidos anteriormente, que se propuseram a fazer esse mesmo levantamento hidrológico, houve um avanço importante. Registra-se que, na literatura disponível, a opção foi feita por protocolos com algum grau de limitação, sem as correções que, no presente momento, julgam-se necessárias, com suporte de códigos computacionais comerciais baseados em metodologias clássicas, como dupla diferença de fases, então empregados, que não são em princípio, os mais adequados para se processar dados de linhas de base maiores do que centenas de quilômetros de largura. Segundo RIZOS (2010), ao usar, na dupla diferença, com apenas uma estação de referência, é esperada uma precisão centimétrica no cálculo das coordenadas para distâncias menores que dezenas de quilômetros e uma precisão sub-métrica para distâncias de centenas de quilômetros para a estação de referência. Por meio de resultados que expõem as limitações do processamento de

longas linhas de base, principalmente em aplicações cinemáticas, sugere-se, nesta tese, o emprego da técnica de posicionamento por ponto preciso (PPP). Complementarmente, delinea-se a contribuição da adição da constelação do GLONASS nesse mesmo tipo de processamento, bem como a técnica de fixação de ambigüidades inteiras no PPP, procedimentos que não são, em geral aplicados por muitos dos trabalhos apresentados na literatura técnico-científica. Detalhes metodológicos do procedimento empregado para responder ao segundo objetivo específico podem ser encontrados no corpo textual do presente documento de tese. Cabe ainda destacar, naturalmente, a obtenção da altitude do zero das réguas a uma mesma referência de dezenas de estações fluviométricas, que, juntamente com perfis longitudinais dos rios, contribuirão significativamente para estabelecer um novo paradigma na construção e na elaboração de trabalhos nas áreas de hidrologia e hidráulica da bacia Amazônica, com desdobramentos e rebatimentos em termos de quantidade e qualidade de água na região. Trata-se de dados únicos gerados, que serão fundamentais para subsidiar estudos científicos e projetos de engenharia e pesquisa em hidrologia espacial, com potencial emprego em diversas outras bacias hidrográficas distribuídas no planeta.

No que diz respeito ao terceiro objetivo específico, a grande contribuição da tese em relação à literatura, foi, de fato, revelar e explicitar a possibilidade de efetuar a avaliação de dados de altimetria espacial usando receptores GPS, com a premissa de que, a partir dessa estratégia e desse arcabouço metodológico de medição, é possível avaliar dados a partir de uma mesma referência altimétrica, fato que permitiu a detecção de erros sistemáticos nos satélites (CALMANT *et al*, 2013; SEYLER *et al*, 2013). O método apresentado e utilizado para avaliar o satélite ICESAT foi considerado, conceitualmente e na prática, o mais adequado e possivelmente, no momento, o ideal, possibilitando identificar, nos trabalhos publicados anteriormente (HALL *et al*, 2011), alguns desvios e diferenças, tendo em vista terem sido desenvolvidos com base em conceitos e fundamentos então disponíveis, ora revisitados nesta tese.

1.5 Síntese da abordagem metodológica

A metodologia proposta por esta tese contempla a busca de altitudes, em uma mesma referência altimétrica, das réguas linimétricas de dezenas de estações fluviométricas da bacia Amazônica, o que contribuiu para a definição da proposta metodológica inicial de um referenciamento único para a rede hidrometeorológica

nacional administrada pela ANA (Agência Nacional de Águas), onde, em princípio, as estações fluviométricas de todo o Brasil encontram-se sob uma referência altimétrica arbitrária.

É consenso que essa referência comum a todas as estações fluviométricas tem fundamental importância para hidrologia, já que algumas dessas estações possuem mais de 100 anos de dados monitorados. Tendo em mente que as estações estão referenciadas localmente, nota-se que os marcos locais arbitrários podem sofrer movimentos causados, por exemplo, por grandes cheias, movimentos de massa e até mesmo abalos sísmicos. Esses fenômenos podem causar inclusive a perda da referência estabelecida localmente, impossibilitando, inevitavelmente, a reconstrução das séries hidrológicas.

Destaca-se que, nesse sentido, por exemplo, movimentos menores na referência de nível local das réguas limimétricas podem passar despercebidos, induzindo estudos, que se apóiam nessas informações apropriadas incorretamente, a interpretar algumas alterações como evidências de mudanças climáticas.

O ponto chave para a determinação dessa referência altimétrica comum na região Amazônica está no uso de receptores GNSS. Nesta tese, são discutidas as estratégias de processamento desses dados, com o objetivo de alcançar uma mesma referência altimétrica para todas estações fluviométricas, levando em conta a esparsa rede de estações de referência GNSS e o tempo expedido para o levantamento.

Com base no propósito de gerar uma informação altimétrica com alto nível de precisão, tornou-se necessário mensurar a variação do referencial ao longo do tempo, atentando para a correção de uma série de fenômenos físicos, tais como efeitos de carga hidrológica e de outros movimentos da crosta. Adicionalmente, nesta tese de doutorado, são empreendidos esforços na comparação entre os sinais de carga hidrológica derivados de tecnologia GNSS, de modelagem hidrológica e de satélites que modelam o campo gravitacional terrestre, a fim de oportunizar a correção dos fenômenos físicos que afetam, em princípio, todas as técnicas geodésicas, que permitem medir, por sua vez, o nível altimétrico de cursos de água.

Quanto à questão de dados GNSS, foram aproveitados parte dos dados produzidos por MOREIRA (2010). Seguindo a recomendação proposta em sua dissertação de mestrado, nesta tese, os dados foram reprocessados utilizando novas

estratégias e técnicas, a se destacar o método de resolução de ambigüidades inteiras recentemente implementada no código computacional GINS-PC (LOYER *et al.*, 2012). O modo de processamento cinemático foi, também, aperfeiçoado em sua capacidade computacional e detecção de erros de dados brutos, o que permitiu o uso de receptores a bordo de barcos, possibilitando, posteriormente, a obtenção de perfis longitudinais dos rios amazônicos.

Em comparação aos estudos realizados por MOREIRA (2010), no presente trabalho, propõe-se a utilização de uma maior distribuição espaço-temporal de dados GNSS e das séries do satélite GRACE, agregando-se as seguintes contribuições:

- avaliação da deformação crustal obtida através de modelagem hidrológica (modelo HYDL);
- comparação das séries de deslocamento crustal derivadas da missão espacial GRACE, oriundas dos diferentes centros (GRGS, CSR, GFZ e JPL) que processam e fornecem os dados desse satélite.

Os procedimentos supracitados permitem gerar informações que podem, então, ser comparadas com dados de estações GNSS de forma a avaliar as correspondentes precisão e qualidade.

Por fim, a partir de dados GNSS, avalia-se a técnica de altimetria espacial, em comparação com dados de estações convencionais que foram referenciadas por meio de técnicas de posicionamento global e também por dados de perfis altimétricos gerados por receptores GNSS, instalados a bordo de embarcações em levantamentos de campo, que permitiram melhor estimar a declividade entre dados de cotas fluviométricas.

1.6 Área de estudo

O estudo enfoca, como estudo de caso, a bacia Amazônica, em especial as sub-bacias do rio Negro, Solimões e Madeira. Diversas campanhas de coleta de dados foram conduzidas para a pesquisa.

Nesse contexto, as campanhas de campo, mais adiante detalhadas e referenciadas no documento, realizadas no âmbito do desenvolvimento do projeto “*Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas*”, propiciaram as condições necessárias à coleta de grande parte dos dados estudados. O projeto é uma iniciativa de

cooperação entre a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, empresa pública do Ministério de Minas e Energia do Brasil, e o *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD), organismo do governo francês, estabelecido formalmente a partir de 2009, tendo sido viabilizado a partir de projeto acadêmico-científico CAPES-COFECUB No. 516/05 intitulado “*Modelagem Hidrológica-Atmosférica aplicada à Gestão de Grandes Bacias Hidrográficas*”, desenvolvido e documentado mediante dissertações e teses elaboradas entre os anos de 2004 e 2013, onde a presente tese é fruto ainda dessa iniciativa acadêmica, concebida e liderada pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, tendo em vista o estudo do comportamento hidrodinâmico, hidrológico e atmosférico da bacia Amazônica, com ênfase no monitoramento hidrológico espacial via sensoriamento remoto.

Adicionalmente, cabe destacar que foram utilizados, também, os dados coletados por receptores GNSS, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, no contexto de realização de campanhas de campo do projeto *Ore-Hybam* (Observatório de Pesquisa em Ambiente - Controles geodinâmico, hidrológico e biogeoquímico da erosão/alteração e da transferência de materiais na bacia amazônica).

No âmbito da operação da rede hidrometeorológica nacional brasileira, operada pela CPRM e gerenciada pela Agência Nacional de Águas - ANA, do Ministério de Meio Ambiente do Brasil, as campanhas realizadas pela CPRM forneceram dados preciosos para este estudo. Os dados de estações GNSS da rede de monitoramento contínuo – RBMC, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, foram também utilizados e contribuíram para a avaliação dos procedimentos metodológicos de processamento GNSS aqui empregados.

Na Figura 1.1, apresenta-se a área de estudo, com seus principais rios, bem como as estações fluviométricas e estações GNSS existentes na bacia Amazônica.

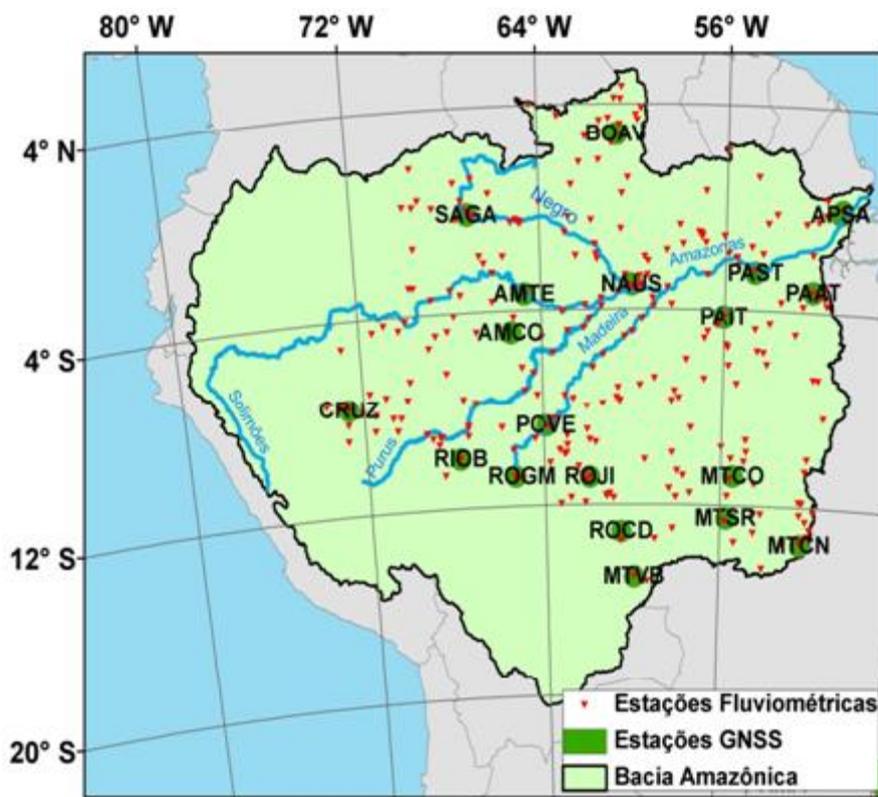


Figura 1.1 – Área de estudo, com identificação das estações GNSS utilizadas e das estações da rede hidrometeorológica nacional.

1.7 Estrutura da tese

A tese está estruturada em seis capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório, que apresenta a motivação e alguns antecedentes e trabalhos históricos que serviram de suporte a esta pesquisa, de forma a apresentar, com clareza, o objetivo geral e três objetivos específicos que sustentam a questão científica proposta, evidenciando-se pontuadamente as contribuições originais do trabalho.

Na seqüência do texto, compreendendo os capítulos seguintes, concentra-se atenção na fundamentação teórica e na revisão bibliográfica, na abordagem metodológica empregada para a análise de dados geodésicos, seus referenciais teóricos e tecnologias envolvidas com aplicação dedicada na região Amazônica, que foi adotada como estudo de caso da tese, permitindo-se, ao final, obter os correspondentes resultados e tecer pertinentes conclusões e recomendações do trabalho.

O segundo capítulo aborda fundamentos dos referenciais usados em geodésia, dando ênfase na importância da construção de um sistema geodésico e monitoramento dessa referência ao longo do tempo, abrangendo a questão dos movimentos da crosta terrestre, que afetam, de forma significativa, a coordenada vertical. Indica-se, também, modelos de correção que devem ser utilizados em levantamentos geodésicos e a importância do uso de modelos do geopotencial em aplicações hidrológicas, bem como informações sobre os satélites artificiais usados em aplicações hidrológicas utilizados neste estudo. Extensa revisão bibliográfica é produzida sobre estudos conduzidos para a bacia amazônica mediante o emprego de sensoriamento remoto e, particularmente, que tenham empregados dados de altimetria espacial e dados da missão GRACE.

O terceiro capítulo detalha a metodologia da tese que se propõe responder ao objetivo geral estabelecido. Essa metodologia, por sua vez, compõem-se de diferentes fluxogramas metodológicos particularizados contendo os procedimentos associados para percorrer mais detalhadamente os objetivos específicos nominados no texto. Nesse sentido, visa apresentar os processos que envolvem o levantamento e processamento de dados GNSS realizados neste estudo, mostrando a escolha da ferramenta computacional, da metodologia de coleta, processamento e análise dos dados. O texto do capítulo está dividido em partes sequenciais, essenciais para alcançar a precisão necessária para a melhor execução no processamento de dados GNSS, primeiramente avaliando o procedimento de processamento, com finalidade de obter a melhor precisão possível para levantamentos GNSS executados na bacia Amazônica. Adicionalmente, são apresentadas as metodologias de procedimentos de correção de carga hidrológica, um importante fenômeno que convencionalmente não é modelado e que degrada a precisão dos levantamentos geodésicos.

No quarto capítulo, é apresentado o estudo de caso da tese, descrevendo algumas características fisiográficas da bacia Amazônica, com detalhamento das diversas informações coletadas nas diversas campanhas de campo e discriminação de dados empregados no estudo.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados das diversas informações coletadas nas diversas campanhas de campo, como a altitude do zero das réguas linimétricas, obtida por ocupação das referências de nível dessas réguas por receptores GNSS, sendo, ainda, apresentado o método cinemático utilizando receptores a bordo de

barcos. Por meio desse método, é possível obter a altitude do zero das réguas de forma rápida, incluindo todas as réguas existentes ao longo do percurso da embarcação. Torna-se possível, ainda, diante de sucessivas passagens por uma mesma régua, avaliar a qualidade de dados fluviométricos no nível de precisão centimétrico. Na segunda parte do Capítulo 5, são apresentados resultados dos perfis cinemáticos obtidos através de levantamentos com receptores GNSS e expostas comparações desses perfis levantados com outras técnicas de geodésia, como altimetria espacial e dados convencionais obtidos por réguas. Em seqüência, apresenta-se avaliação de dados fluviométricos do satélite ICESAT, em que, com ajuda das réguas referenciadas e declividades calculadas pelos perfis GNSS, é possível analisar, com precisão, o emprego da informação de dados do satélite ICESAT na obtenção de cotas fluviométricas.

O sexto capítulo encerra a tese, com uma narrativa sintética do histórico da tese, destacando-se as conclusões gerais a partir da questão científica proposta. Nessa análise conclusiva, discorre-se sobre a avaliação geral das técnicas e procedimentos aplicados para atender o objetivo geral do trabalho, situando os resultados obtidos no contexto sinérgico da hidrogeodésia, que abrange a aplicação de dados geodésicos em levantamentos hidrológicos e hidráulicos, formulando-se, então, recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, são descritos os processos de aquisição e de processamento de dados geodésicos. Sob o prisma de dados geodésicos, são apresentadas informações conceituais de sistemas geodésicos, significado de altitude, conversões e correções. Posteriormente, discorre-se sobre as principais técnicas geodésicas utilizadas neste estudo. A partir desses conceitos, pode ser aperfeiçoada a avaliação desses dados e também a correspondente aplicação de forma mais adequada em estudos de pesquisa e de engenharia.

A descrição mais detalhada de conceitos empregados nesta tese pode ser encontrada em referências específicas na área de geodésia, como GEMAEL (1999), TORGE (2001), CHELTON *et al.* (2001), KOVALEVSKY *et al.* (1989), SEEBER (2003), CAMPOS (2004) e BLITZKOW *et al.* (2011).

2.1 Redes de referência

Conforme estabelecido no primeiro capítulo, o presente trabalho encontra suporte na aplicação de dados geodésicos em levantamentos hidrológicos. Para tanto, faz-se necessária a compreensão de alguns fundamentos sobre referenciais geodésicos, modelos de correção utilizados no processamento de dados e representatividade das informações levantadas.

Caracteriza-se, inicialmente, o estudo de referenciais geodésicos como uma etapa indispensável para a correta avaliação e aplicação de dados geodésicos. A partir do conhecimento e do uso desses referenciais, cria-se o elo necessário para efetuar correções, comparações e avaliações entre diversos tipos de dados a serem utilizados.

Em adição, uma questão hidrológica importante deve ser considerada. Conforme citado no capítulo introdutório, dados de cotas fluviométricas encontrados no banco de dados hidroweb da ANA estão sobre uma referência altimétrica arbitrária, com variação descrita em relação a uma estrutura física local implementada como referência. Por se tratar de uma referência arbitrária e unicamente relacionada com o local de

monitoramento, movimentos resultantes dessa referência são propagados, de forma sistemática, para as leituras das cotas fluviométricas. Esse fato prejudica a manutenção da qualidade de séries históricas de níveis de água produzidos por uma estação fluviométrica ao longo de seu período de operação, adicionando, ainda, a dificuldade de associação dos níveis de água obtidos com outras fontes de dados.

Nesse sentido, busca-se um referencial global para os níveis de água registrados por essas estações, que visem, primeiramente, a contabilizar os movimentos ao longo do tempo dessa referência arbitrária, bem como uma referência que permita a compatibilização de diversas fontes de informação hidrológica, de forma que os valores fluviométricos obtidos por diferentes estações e técnicas possam ser utilizados de forma conjunta e correta em estudos hidrológicos.

A partir desse propósito, faz-se necessário recorrer aos conceitos de sistemas de referência e de redes de referência utilizados em geodésia. Nessa condição, faz-se necessário compreender que a Terra e corpos celestes no Universo não são estáticos, estando sujeitos a deformações e movimentos diversos, na medida em que a compreensão cinemática e dinâmica desses fenômenos consistem em um dos maiores desafios de ciências como a geodésia, astronomia e geofísica (KOVALEVSKY *et al.*, 1989). Pode-se citar, segundo KOVALEVSKY *et al.* (1989), fenômenos dinâmicos que são temas de estudo dessas ciências, como, por exemplo:

- movimentos das placas litosféricas;
- marés oceânicas e terrestres;
- efeitos de carga sobre a crosta terrestre;
- movimento polar;
- rotação da Terra;
- comportamento dinâmico do sistema Terra-Lua;
- movimento dos planetas e satélites;
- rotação de planetas e satélites;
- movimento de estrelas na galáxia;
- dinâmica de aglomerados de estrelas;
- evolução da associação estrelas e aglomerados abertos;
- rotação diferencial da galáxia;
- movimento em aglomerados de galáxias.

KOVALEVSKY *et al.* (1989) frisa que compreender a posição e o movimento de um objeto não são conceitos absolutos, demandando que sejam descritos em relação a uma referência. Matematicamente, essa descrição é feita usando um sistema de coordenadas, necessitando meios de observação que liguem o ponto de interesse, para o qual se deseja a posição e/ou movimento, com o referido sistema. Precisa-se, pois, realizar o sistema de referência terrestre, materializando-o fisicamente (ALTAMINI *et al.*, 2002). O propósito de uma rede de referência é prover meios de materializar o sistema de referência de modo a descrever posições e movimentos de objetos na Terra, ou de corpos celestes, incluindo a própria Terra, no espaço.

As etapas de construção e definição dessa rede de referência segundo KOVALEVSKY *et al.* (1989) podem ser definidas, em seqüência, como:

- conceito;
- escolha da estrutura física;
- modelagem da estrutura;
- realização do sistema;
- extensão e ampliação da densidade.

A etapa de conceito é o começo da construção de uma rede de referência que se baseia na obediência a um princípio chamado de sistema de referência ideal, com suporte em mecânica Newtoniana, em que a sua origem está de acordo com a lei da inércia de Newton. Mais detalhes desse conceito de sistema ideal podem ser encontrados em KOVALEVSKY *et al.* (1989) e também em BLITZKOW *et al.* (2011).

A etapa de escolha da estrutura física fundamenta-se no pressuposto de que, a partir da escolha do sistema de referência ideal, é necessário identificar corpos físicos que darão suporte à definição. Essa escolha é feita a partir de estruturas que atendam o melhor ajuste quanto ao sistema ideal, por meio de suas constantes, equações, movimentos, entre outros aspectos, que constituirão propriamente o sistema de referência.

Na etapa de modelagem da estrutura, depois de feita a escolha da estrutura física, deve-se atribuir valores para os parâmetros que descrevem o sistema físico escolhido no sistema de referência adotado. No entanto os valores selecionados têm necessariamente

algum grau de arbitrariedade. Por essa razão, o modelo que representa o sistema de referência é chamado sistema de referência convencional (KOVÁLEVSKY *et al.*, 1989). Outra justificativa diz respeito aos meios, usualmente convencionais, por meio dos quais a rede de referência é definida na prática.

A realização do sistema é feita através de observações levadas a efeito a partir de pontos devidamente materializados sobre a superfície da Terra e conduzidos sobre objetos adequados para o caso, estabelecendo-se um conjunto de coordenadas de referência para os pontos. Esse conjunto de pontos constitui uma rede de referência global, utilizada para vincular outras determinações (BLITZKOW *et al.*, 2011).

A título de ilustração, a materialização de um sistema de referência terrestre implica a escolha de estruturas físicas extremamente estáveis, com apenas pequenos movimentos ao longo do tempo devido a efeitos geofísicos (tectônica de placas e deformações na crosta). Esses movimentos podem ser explicados por teorias físicas, permitindo, portanto, que sejam modelados e corrigidos.

A extensão da rede está relacionada à insuficiência de pontos fiduciais, que permitem a determinação de posições de qualquer região de interesse. Nesse sentido, são adicionados pontos secundários de referência em número suficiente para auxiliar na determinação de coordenadas de pontos desconhecidos. No que tange ao tópico de ampliação da densidade, pode-se citar a rede de referência continental, mais especificamente a rede SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (BLITZKOW *et al.*, 2011).

Três associações internacionais estão envolvidas na construção e definição dessa rede de referência, notadamente a Associação Internacional de Geodésia, a União Astronômica Internacional e a União Geodésica e Geofísica Internacional. Elas são conhecidas pelas siglas na denominação em língua inglesa, respectivamente: IAG (*International Association of Geodesy*), IAU (*International Astronomical Union*) e IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*). A densificação tem ficado por conta de organizações nacionais e locais (BLITZKOW *et al.*, 2011). Com o advento da era espacial e depois de décadas de estudo e análise, concluiu-se que dois referenciais seriam suficientes: o referencial celeste (rc) e o referencial terrestre (rt). Nesta tese, apenas explanam-se alguns conceitos sobre o referencial terrestre. Maiores detalhes

podem ser consultados em algumas referências, como, por exemplo, em KOVALEVSKY *et al.* (1989), PETIT e LUZUM (2010) e BLITZKOW *et al.* (2011).

A realização do sistema de referência terrestre (TRS – terrestrial reference system), mais precisa, atualmente, no nível global, e utilizado em aplicações geodésicas, chamada de ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), é feita pelo Serviço Internacional de Rotação da Terra e de Sistemas de Referência (IERS - *International Earth Rotation and Reference Systems Service*), criado pela IUGG e pela IAU em 1987, tendo iniciado seu funcionamento em primeiro de janeiro de 1988. O IERS também é responsável por estabelecer e manter a Rede de Referência Celeste (*Celestial Reference Frame- ICRF*) e calcular os parâmetros de orientação da Terra (*Earth Orientation Parameters- EOPs*) que conectam a rede de referência celeste e terrestre. Na realização do ITRF, adiciona-se, à sigla ITRF, o ano das últimas observações utilizadas na construção da solução. Trata-se, a título de exemplo, do ITRF2008, que foi proposto em 2010, sendo referente ao catálogo de posições e velocidades de estações, usando dados de observações disponíveis até o final de 2008 (junho de 2009 para observações GPS).

O ITRF 2008, que pode ser acessado para maiores detalhes nas convenções do IERS(2010), com base em PETIT e LUZUM (2010), segue os seguintes princípios:

- 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 a coordenada temporal geocêntrica (TCG), de acordo com as resoluções de 1991 da IAU (*International Astronomical Union*) e da 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.

A realização ITRF é efetuada pelo ajustamento de várias estações, com as coordenadas das estações sendo obtidas através da combinação de várias tecnologias de posicionamento espacial: VLBI (*Very Long Base Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*). 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. Utiliza-se a combinação das soluções dadas pelos diversos métodos (VLBI, SLR, GNSS e DORIS) para, assim, escolher a técnica mais adequada para cada parâmetro, conforme apresentado na Figura 2.1 e na Tabela 2.1 (ALTAMINI *et al.*, 2007).

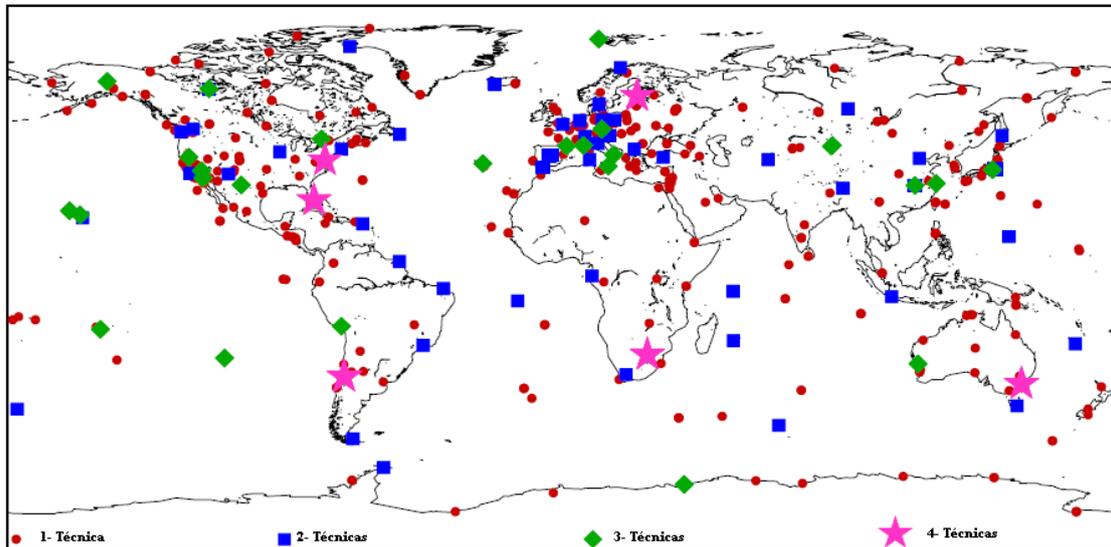


Figura 2.1-Estações e suas técnicas utilizadas na realização do ITRF2005 (Fonte: ALTAMINI, 2009).

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 pólo	SIM	SIM	SIM	SIM
Fator de escala	SIM	SIM	NÃO	SIM
Origem do ITRF	NÃO	SIM	FUTURAMENTE	FUTURAMENTE
Densidade geográfica	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Tempo-real e acesso ITRF	SIM	SIM	SIM	SIM
Estabilidade decadal	SIM	SIM	SIM	SIM

As soluções do ITRF, em geral, são expressas de forma cartesiana (X, Y e Z). No entanto diversas aplicações exigem que tais coordenadas sejam parametrizadas e

transformadas em coordenadas ditas geográficas (latitude, longitude e altitude elipsoidal), de forma a permitir e a facilitar cálculos de ângulos, distâncias e desníveis entre pontos sobre a superfície terrestre; com esse propósito, é escolhido um elipsóide de revolução, figura matemática que mais se assemelha à forma da Terra. Nesse sentido, em geral, são utilizados o elipsóide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*), que possui uma pequena variação no achatamento terrestre em relação ao elipsóide do WGS84 (*World Geodetic System 1984*). Mais especificamente, essa diferença de elipsóide pode ser encontrada no parâmetro de achatamento do WGS84 igual a $1/298,257223563$ e o parâmetro de achatamento do GRS80 igual a $1/298,257222101$.

2.1.1 Redes de referência adotadas no estudo

Existe uma série de redes de referência no globo, com diferentes estações usadas na sua materialização e com diferentes épocas de realização. A rede de referência utilizada, neste trabalho, é o IGB08, que se trata de uma realização do IGS (*International GNSS Service*) do ITRF2008. Desde 2000, o IGS usa redes específicas de referência a partir das realizações do ITRF para a distribuição de seus produtos, como, por exemplo, órbitas, relógios e arquivos de calibração de antenas GNSS. As redes usadas pelo IGS têm, como objetivo, aumentar a qualidade dos produtos disponibilizados. Essa melhoria é executada com o aumento do número de estações utilizadas na rede, retirada de estações que tiveram movimentos não lineares ou foram desativadas, recálculo de coordenadas das estações utilizadas na realização da rede de referência. O IGB08 está alinhado com o ITRF2008 (ALTAMIMI *et al.*, 2011) no nível centimétrico. O sistema IGB08 foi utilizado, nesta tese, pelo fato das coordenadas, obtidas a partir de levantamentos GNSS, mediante o método PPP, encontrarem-se na rede de referência segundo a qual as órbitas dos satélites foram tratadas, respectivamente processadas pelo IGS.

As transições entre os diversos sistemas geodésicos e suas épocas específicas podem ser feitas através da transformação de Helmert generalizada, que emprega, em princípio, sete (7) de um total de 14 parâmetros, que definem a posição e a orientação de um sistema geodésico em relação ao outro. Aplicam-se três (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 três (3) rotações, uma

para cada um dos eixos, totalizando sete (7) parâmetros. Ao se considerar, então, a transformação de coordenadas terrestres de diferentes épocas, deve-se levar em conta as correspondentes variações no tempo de cada um dos sete (7) parâmetros utilizados, totalizando, assim, 14 parâmetros de transformação (SAPUCCI e MONICO, 2001).

Contudo deve-se ter critério no cálculo dos parâmetros a serem utilizados na transformação entre os diversos sistemas geodésicos, pois as técnicas utilizadas devem respeitar 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.

2.1.2 Referências Verticais

Devido ao fato do elipsóide ser uma figura matemática e suas altitudes elipsoidais terem um caráter geométrico, sendo a altitude definida pela distância do ponto medido ao longo da linha normal até o elipsóide de referência, 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. A obtenção de valores de 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).

Dessa forma, é comum a adoção de um sistema de altitudes com significado físico, no Brasil e na maioria dos países. Essas altitudes, que tem, como seu referencial, o geóide, são chamadas de ortométricas, sendo definidas pela distância ao longo da vertical do ponto da superfície terrestre até a superfície geoidal. O geóide é, por sua vez, definido como um corpo cuja superfície é equipotencial, que melhor se ajusta ao nível médio não perturbado 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.

BLITZKOW *et al.* (2011), no entanto, ressalta que a determinação de altitude ortométrica é dependente do conhecimento das densidades no interior da crosta e que os modelos existentes de tal distribuição ainda são insuficientes para o cálculo da altitude ortométrica, ao menos em caráter continental dentro das precisões exigidas pela Geodésia.

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). Por outro lado, a escolha do valor zero para a superfície geoidal (*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 do seu zero da escala, dificultando, assim, a conexão de redes altimétricas que usam *data* verticais distintos (LUZ, 2008).

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. O resultado é a determinação da anomalia de altura ao invés da altura geoidal. A superfície que se vincula ao elipsóide através da anomalia de altura é o quasi-geóide. Ou ainda, se a anomalia de altura for plotada a partir da superfície física obtém-se o teluróide. No oceano, o geóide e o quasi-geóide coincidem; por outro lado, em regiões montanhosas, a diferença pode chegar a metros (BLITZKOW *et al.*, 2002). Altitudes com referência ao quasi-geóide são chamadas de altitudes normais. A altitude normal representa a separação entre o elipsóide e o teluróide ou entre o quasi-geóide e a superfície física (Figura 2.2). A vantagem da altitude normal é que ela independe do trajeto percorrido. A desvantagem é que o quasi-geóide ou o teluróide não são superfícies de nível equipotencial. Logo, dois pontos com a mesma altitude normal não estarão necessariamente sobre a mesma superfície equipotencial.

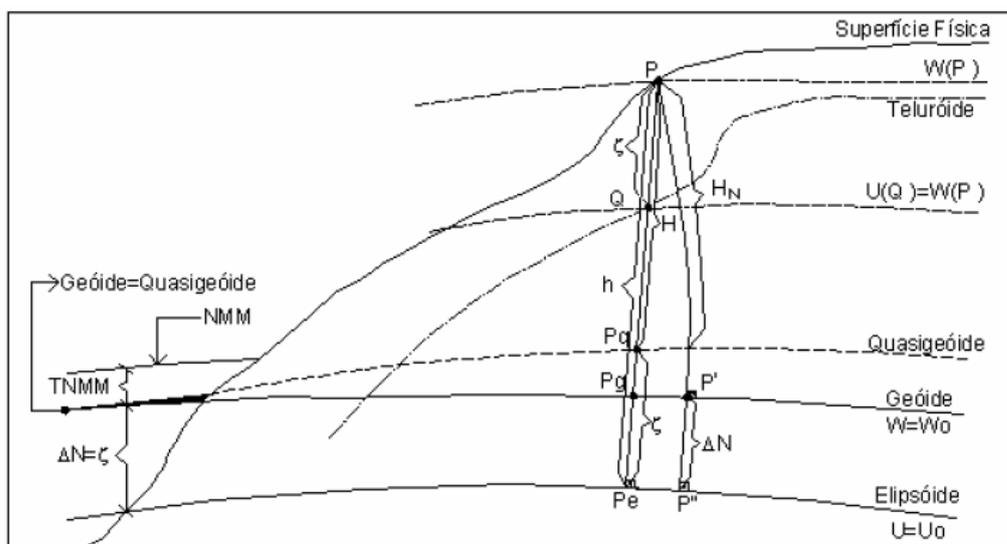


Figura 2.2- Grandezas envolvidas nos referenciais altimétricos (Fonte: FREITAS e BLITZKOW, 1999).

Ressalta-se, ainda, que, muitas tecnologias geodésicas associam-se a altitudes geométricas, também chamadas de altitudes elipsoidais. Para uma melhor aplicação dessas altitudes em engenharia, é necessária a determinação das chamadas alturas geoidais, separação entre as superfícies geoidal e elipsoidal ao longo da normal. Essa separação pode ser obtida a partir do conhecimento do campo de gravidade, que modela a distribuição de massa e o efeito rotacional da Terra e conseqüentemente, permite deduzir a forma da Terra. Na prática, o efeito rotacional é conhecido e o que se procura é modelar o potencial de atração através do potencial perturbador. Essa questão denomina-se "Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG)". Um modelo do geopotencial, como é chamado um conjunto de coeficientes do desenvolvimento do potencial gravitacional em série de funções harmônicas esféricas, contribui decisivamente no PVCG (BLITZKOW *et al.*, 2002).

2.1.2.1 Modelos do geopotencial

Com o avanço e aplicações das técnicas oriundas da geodésia, as quais são referenciadas ao elipsóide e contêm um significado geométrico da atitude, faz-se necessário atribuir um caráter físico a essas altitudes. Nesse sentido, foi desenvolvida uma série de modelos do geopotencial que podem definir de forma aproximada a

ondulação geoidal, termo que é utilizado para definir a distância que separa o geóide do elipsóide de referência.

Pode-se observar, na Figura 2.3, a representação da ondulação geoidal, que pode ser expressa pela fórmula seguinte:

$$N \text{ (ondulação do geóide)} = h \text{ (altitude elipsoidal)} - H \text{ (altitude ortométrica)} \quad (2.1)$$

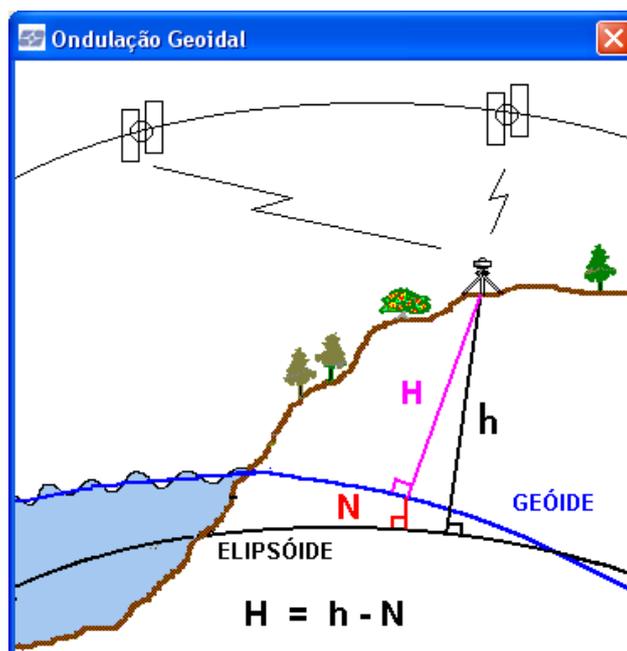


Figura 2.3.- Ondulação geoidal (Fonte: Modelo MAPGEO2010).

Os modelos globais do geopotencial mais utilizados são o EGM96 (*Earth Gravity Model*) e sua versão mais atual, EGM08. Para o Brasil, existe o modelo MAPGEO2010, desenvolvido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), baseado no modelo EGM08 e disponível no sítio http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal_3.shtm. Recentemente, foi disponibilizado, pelo IBGE, o modelo MAPGEO2015, nova versão do modelo de ondulação geoidal do Brasil, calculada com aproximadamente 950.000 estações gravimétricas terrestres na América do Sul, sendo 450.000 dentro do Brasil, com seus aprimoramentos, que podem ser visualizados em ftp://geoftp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/rel_mapgeo2015.pdf

Esses modelos são alimentados por dados gravimétricos terrestres, por informações de relevo, por dados de altimetria radar sobre os oceanos, por estações de SLR e pelo sistema DORIS entre outros componentes.

No trabalho realizado por MOREIRA (2010), foi comprovada a eficiência do uso de modelos do geopotencial na região Amazônica, em que a aplicação do modelo do geopotencial EGM08 (Figura 2.4) permitiu representar, de forma apropriada, informações de níveis de água obtidos na região de estudo do trabalho. Comparações em regiões com superfícies de água equipotenciais ou de baixíssima declividade foram representadas 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. O EGM08 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, desenvolvido, de forma completa, no grau e ordem de 360 com uma reamostragem espacial de arco de 30 minutos (55 km no Equador). O modelo EGM2008 (PAVLIS *et al.*, 2008) é completo até grau e ordem 2159, em termos dos coeficientes das funções harmônicas esféricas e contém informações adicionais dos coeficientes até grau 2190 e ordem 2159. Para o EGM08, foram utilizadas as constantes do WGS84 (*World Geodetic System*), que é o sistema geodésico de referência utilizado em Geodésia, em navegação e no cálculo das órbitas transmitidas dos satélites do GPS. No WGS84, as constantes utilizadas para definir o elipsóide e o campo gravitacional, com respeito ao quais as ondulações do geóide estão referenciadas, são:

$$a = 6378137.00 \text{ m (semi-eixo maior do elipsóide do WGS 84);}$$

$$f = 1/298.257223563 \text{ (achatamento do elipsóide WGS 84);}$$

$$GM = 3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \text{ (produto da massa da Terra e da constante gravitacional);}$$

$$\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ radianos} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (velocidade angular da Terra).}$$

PAVLIS *et al.* (2008) cita que todas as operações do modelo EGM08 são realizadas assumindo um sistema livre de maré (*Tide Free System*). É aplicada, ainda, a constante do termo de grau zero de -41 cm em todas as ondulações geoidais calculadas; essas ondulações geoidais são obtidas por meio de um modelo de transformação de

anomalias de altura para ondulações geoidais. Maiores detalhes do modelo do geopotencial EGM08 podem ser encontrados em PALVIS *et al.* (2012). Essa constante, no valor de -41 cm, é utilizada para converter ondulações geoidais, que são intrinsecamente associadas a um elipsóide médio terrestre ideal, em grandezas referenciadas ao WGS84. 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>.

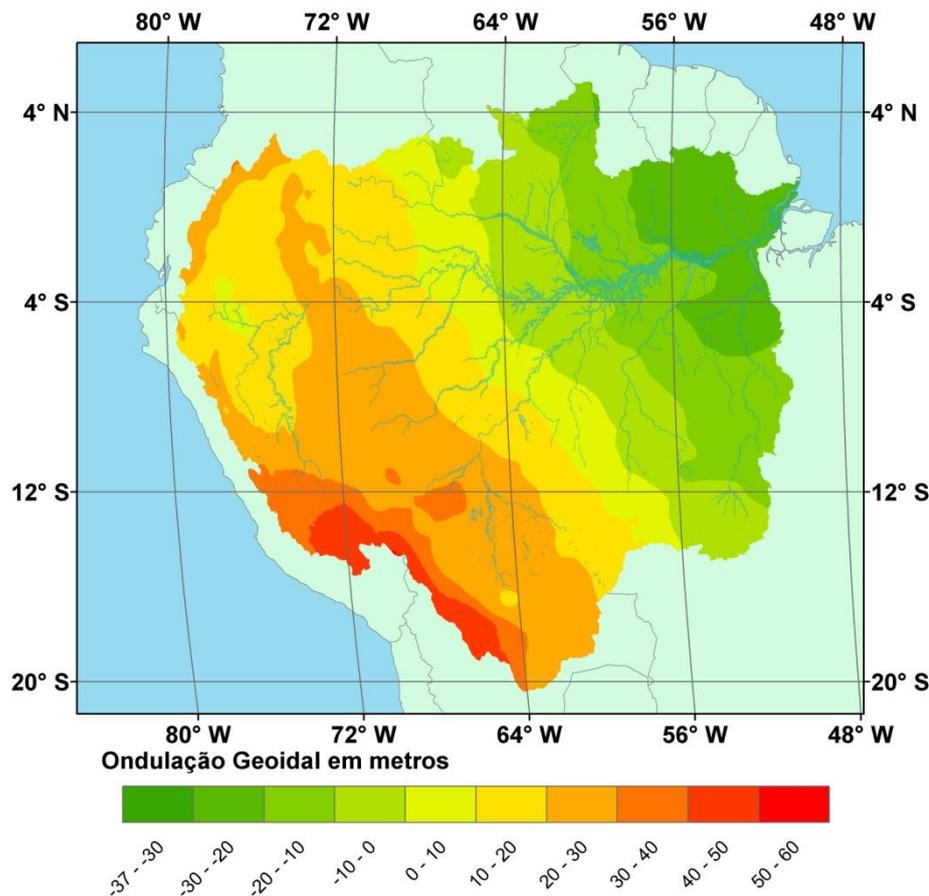


Figura 2.4- Modelo do geopotencial EGM08 e sua ondulação geoidal (em metros) na área de estudo do trabalho.

Lançado em março de 2009, o satélite GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explore*) também proporcionou novos avanços no conhecimento das ondulações do geóide. Publicados a partir de 2011, os modelos da série EIGEN-6C (FÖRSTE *et al.*, 2014) proporcionaram os primeiros exemplares contendo dados gradiométricos do satélite GOCE. A versão final do EIGEN-6C4 está disponível para obtenção em <http://icgem.gfz-potsdam.de>.

O EIGEN-6C4, no estudo realizado por FÖRSTE *et al.* (2014), apresenta ganhos e perdas dependendo da região de análise quando da comparação de seus resultados com o EGM08, devido à carência e à qualidade dos dados para validação desses modelos na região amazônica, observando que a escolha do melhor modelo para região é inconclusiva. Note-se, ainda, que outros modelos, como é o caso do MAPGEO2010 e do recentemente lançado MAPGEO2015, que são produzidos conjuntamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através da Coordenação de Geodésia (CGED), e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, podem oferecer melhores soluções locais no território brasileiro devido à adição de informações do banco de dados gravimétricos da América do Sul pertencente à EPUSP (BLITZKOW *et al.*, 2008) .

Por outro lado, optou-se, nesta tese, por apresentar os principais resultados da pesquisa mediante o emprego do EGM08 (Figura 2.4). A escolha foi baseada na boa experiência adquirida com o tratamento dos dados apresentados por MOREIRA (2010), além do fato do modelo EGM08 ser o modelo do geopotencial global recomendado pelas convenções do IERS (2010) (PETIT E LUZUM, 2010).

Embora tenha sido feita essa escolha fundamentada pelo modelo EGM08, observa-se que foram testados outros modelos para caracterização de perfis longitudinais de forma a oferecer uma sensibilidade do impacto da escolha do modelo de geóide nos resultados gerados. A Figura 2.5 apresenta a ordem de grandeza de valores de diferença entre os modelos EGM08 e EIGEN-6C4 para a região amazônica.

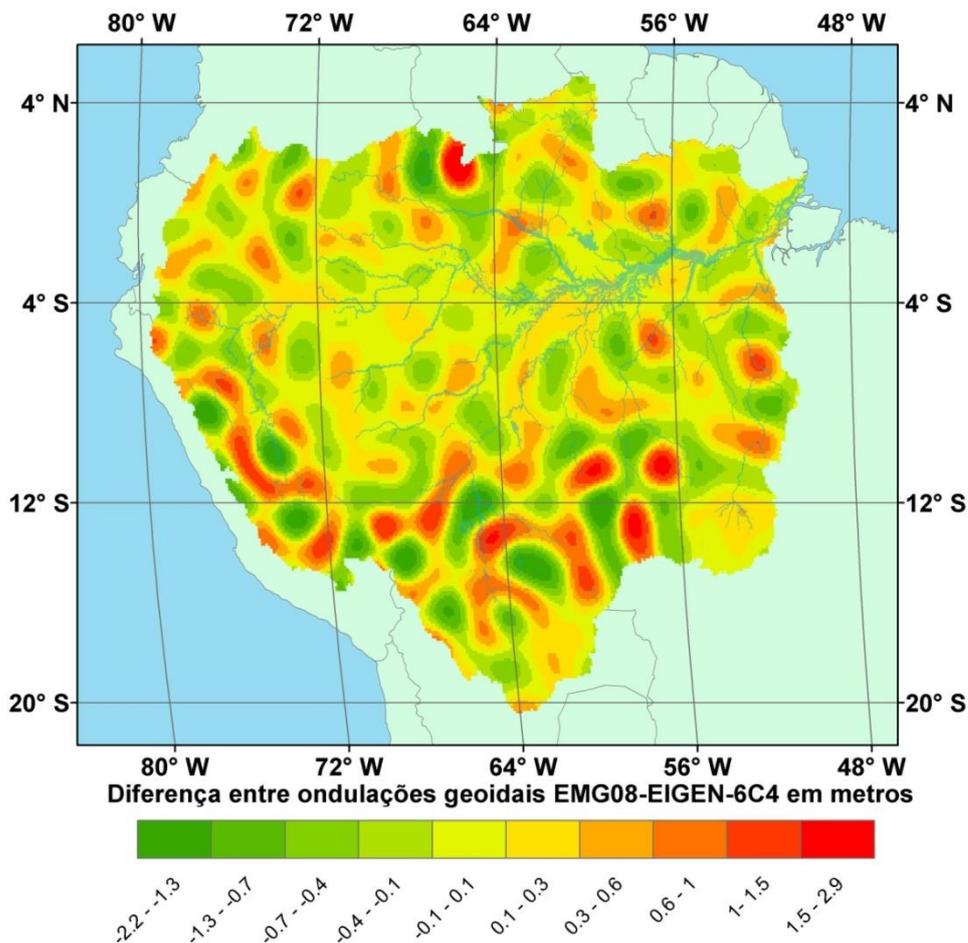


Figura 2.5 - Diferenças entre a ondulação geoidal (em metros) dos modelos EIGEN6c4 e EGM08 na área de estudo do trabalho.

Como apresentado na Figura 2.5, as diferenças entre os diversos modelos de geóide na bacia amazônica podem chegar a metros, levando a que a escolha do modelo gere variações significativas na caracterização hidrológica da região, conforme o estudo proposta nesta tese.

Cabe enfatizar, também, que as ondulações geoidais são obtidas, de forma aproximada, a partir das anomalias de altura adicionadas de uma correção de terreno. No oceano, as anomalias de altura e ondulações geoidais são coincidentes; nos continentes, elas são em função da anomalia de Bouguer e da elevação. Essas correções são baseadas em diversas componentes que podem ser encontradas em RAPP (1996). Sendo assim, essas ondulações geoidais não fornecem altitudes ortométricas de forma rigorosa. Essa aproximação, fornecida pelos modelos do geopotencial, dependerá da distribuição e da precisão da gravidade, do modelo digital de elevação (MDE) e do modelo de densidade da crosta utilizados.

No entanto, todos os dados a serem apresentados, neste estudo, possuem, em sua origem, valores de altura relacionados ao elipsóide de revolução, podendo ter seus valores de altura novamente reduzidos à superfície geoidal, conforme melhores aproximações de ondulações geoidais estejam disponíveis a partir de novos modelos do geopotencial a serem lançados, que possuam uma confirmação de maior precisão que os atualmente existentes.

2.1.3 Modelos de correção

Conforme mencionado anteriormente, o ITRF2008 representa o estado da arte de realização do Sistema Internacional de Referência Terrestre, sendo o uso do ITRF2008 recomendado pelas convenções internacionais do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) (MCCARTHY e PETIT, 2010). De acordo com essas convenções, a posição instantânea de um ponto X na época t definido por $\vec{X}(t)$ relativo à crosta terrestre e à sua posição regularizada no ITRF2008 $\vec{X}_R(t)$ é definida pela Equação 2.1:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_R(t) + \sum_i \Delta\vec{X}_i(t) \quad (2.1)$$

A posição regularizada $\vec{X}_R(t)$ é supostamente determinada livre de variações de alta frequência, tendo os deslocamentos $\Delta\vec{X}_i(t)$ causados principalmente pelos seguintes efeitos:

- maré terrestre;
- carga de maré oceânica;
- carga da pressão atmosférica diurna e semi-diurna;
- perturbações centrífugas causadas por variações de rotação da Terra, incluindo a maré polar e a carga causada pela maré polar oceânica.

Para remoção desses efeitos, modelos de correção são utilizados. Normalmente, esses modelos são baseados nas convenções do IERS (2010), com a função de correção desses fenômenos, papel fundamental para o estabelecimento de redes geodésicas de alta precisão e para a compreensão da geodinâmica da Terra.

Na questão dos modelos de correção, como previamente antecipado, há necessidade de compreender que a Terra, dotada de seu próprio ambiente, e corpos celestes do Universo movem-se, rotacionam e deformam-se, sendo o estudo dessa dinâmica um dos maiores desafios da geodésia. Na questão das deformações, em particular, a Terra devido ao seu corpo visco-elástico, tem sua crosta 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. Diante desse quadro, faz-se necessário modelar essas variações 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. A seguir, serão apresentados os principais modelos de correção.

2.1.3.1 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 tectônicas para ter seu valor ajustado à época do sistema geodésico escolhido.

O modelo utilizado, neste trabalho, é o *ITRF2008 plate motion model* (ALTAMIMI *et al.*, 2012), que é usado para inferir o movimento absoluto das placas tectônicas, estimando-se, assim, suas velocidades angulares. Esse modelo é consistente com o sistema de referência ITRF 2008 utilizado nesta tese.

2.1.3.2 Maré terrestre

A maré terrestre é um fenômeno de deformação do corpo elástico da Terra, causado principalmente por forças de atração gravitacional diferenciais do Sol e da Lua sobre a Terra. Essa deformação não depende apenas da variação da força de atração,

sendo dependente também da estrutura física e de movimentos da Terra (XU, 2007). . 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).

Por sua vez, 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 gravitacional da Terra.

O IERS disponibiliza, em suas convenções, a indicação do 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 da longitude do ponto, frequência de maré (longo período, diurna e semi-diurna) e do grau de desenvolvimento coeficientes do desenvolvimento em séries de funções harmônicas esféricas do potencial gravitacional; 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).

2.1.3.3 Maré polar

As redes de referência são baseadas em uma configuração da Terra, supostamente fixa, com seu pólo médio coincidente com o eixo Z do elipsóide de referência. O ITRF2008 utiliza a posição do pólo médio da Terra, de variação secular, adotado pelo IERS, com o suporte do Centro de Orientação da Terra. Todavia, através de uma série de fenômenos, como, principalmente, diferenças das forças de atração do Sol e Lua na Terra, ocorre variação de seu eixo de rotação em relação ao eixo de rotação médio, utilizado, por sua vez, pelo ITRF.

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 (PETIT E

LUZUM, 2010). Em resposta à variação da força centrífuga causada pela maré polar sobre os oceanos, existe um efeito chamado maré polar oceânica, em que os oceanos, por buscarem uma situação de equilíbrio geopotencial, acabam transferindo massa de um lugar para outro, gerando, em resposta, um pequeno movimento do pólo. A amplitude da oscilação do pólo, causada 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 dois (2) milímetros.

Apesar de serem efeitos menos impactantes, faz-se necessária a correção desse fenômeno. Nesse sentido, pode-se seguir as convenções do IERS, 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 ITRF.

2.1.3.4 Efeitos de cargas

A crosta terrestre responde elasticamente a variações da quantidade de carga ou massa que sobre ela atuam. 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.

As maiores variações sazonais provocadas por carga sobre a crosta terrestre tem 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 (2010) 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. No trabalho realizado por MOREIRA (2010), uma forte correlação entre o ciclo hidrológico da região Amazônica, região de estudo também desta tese, e os fenômenos de carga, que causam deslocamento da crosta nessa região, foi identificada. Propõe-se, no presente trabalho, a continuação do monitoramento desse fenômeno com objetivo de correção dos dados levantados por diferentes técnicas geodésicas.

2.1.3.4.1 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.*, 1994a e VAN DAM *et al.*, 1994b).

Segundo o IERS, variações de vinte (20) hPA (hecto-Pascal) foram observadas em latitudes médias, estendendo-se por áreas de 1000 a 2000 quilômetros, com variações temporais de duas (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, 2010).

Segundo VAN DAM *et al.* (2001), os efeitos de carga atmosférica têm amplitudes maiores em períodos curtos como de duas (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-se usar a grade de 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 graus 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 máxima da deformação crustal causada por carga atmosférica calculada a partir de dados mensais ECMWF que foi o modelo de correções de carga atmosférica adotado neste estudo.

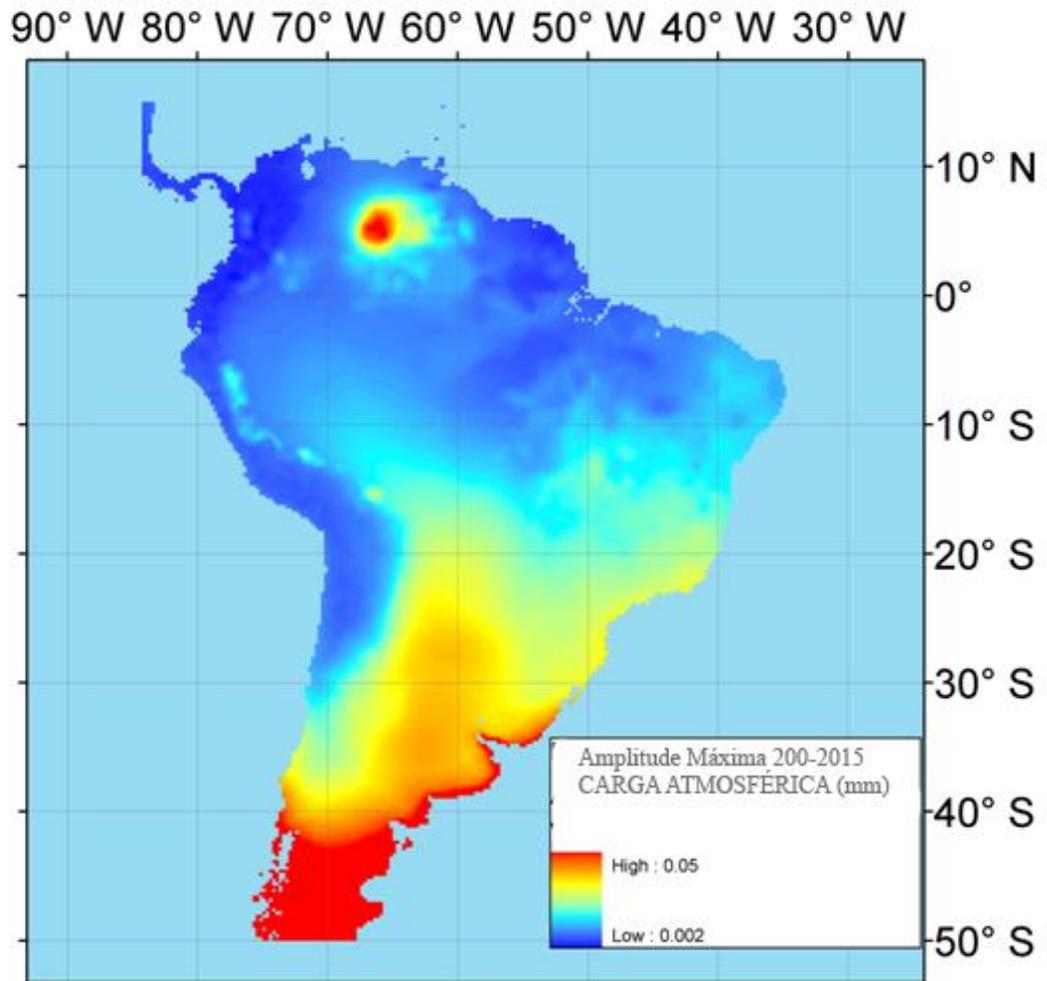


Figura 2.6 - Amplitude máxima de deformação crustal causada por contribuição de variação de pressão atmosférica com séries mensais do ECMWF de 2000 á 2015.

2.1.3.4.2 Carga oceânica das marés

As marés oceânicas causam uma redistribuição de massas do oceano. 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 (2010) 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). Em geral, as marés oceânicas são modeladas, na 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 2.7, com duração aproximada de 12 horas e 25 minutos.

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

Para correção, pode-se usar, também, o modelo de maré mais atualizado em relação às normas do IERS (2010), que corresponde ao FES2004 (LYARD *et al.*, 2006), que contempla a modelagem de marés com base em modelagem hidrodinâmica, em dados de altimetria espacial e em dados de marégrafos.

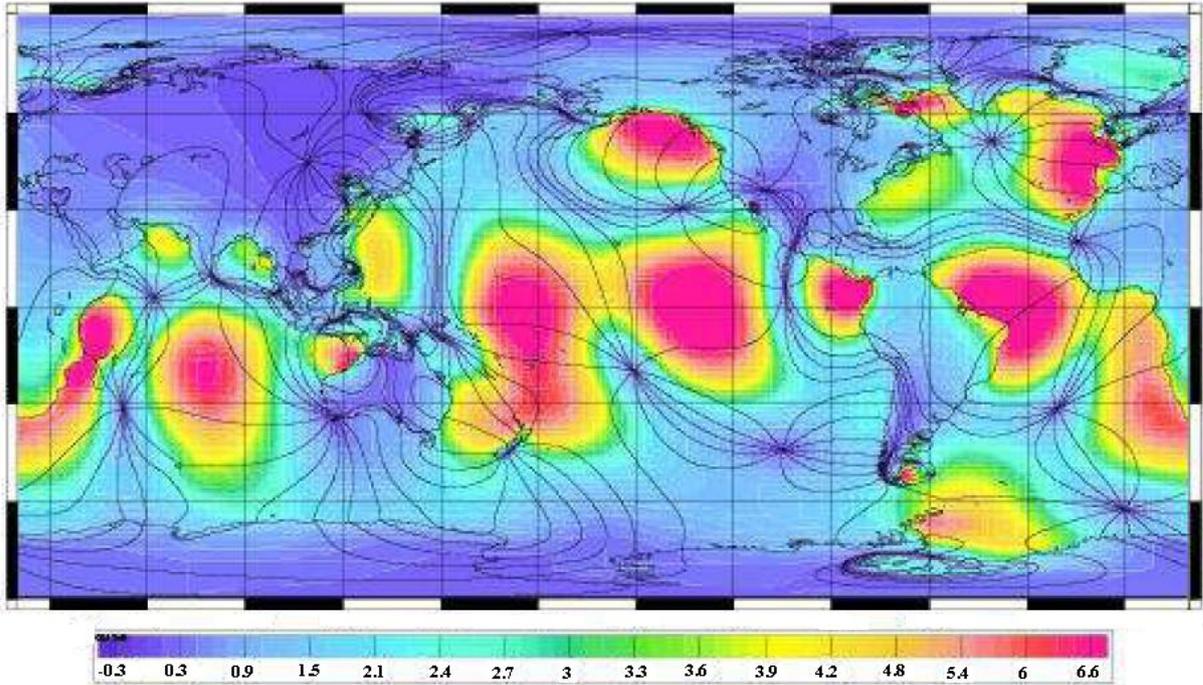


Figura 2.7 - Carta global da amplitude da maré M2 e de seu efeito de carga oceânica em centímetros (Fonte: LEGOS apud PEROSANZ, 2006).

2.1.3.4.3 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 região de atuação da carga e sua conseqüente deformação crustal. VAN DAM *et al.* (2001) modelaram os fenômenos de carga hidrológica e quantificaram a amplitude dos efeitos de carga, via de regra 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 Amazônica e de outras bacias tropicais

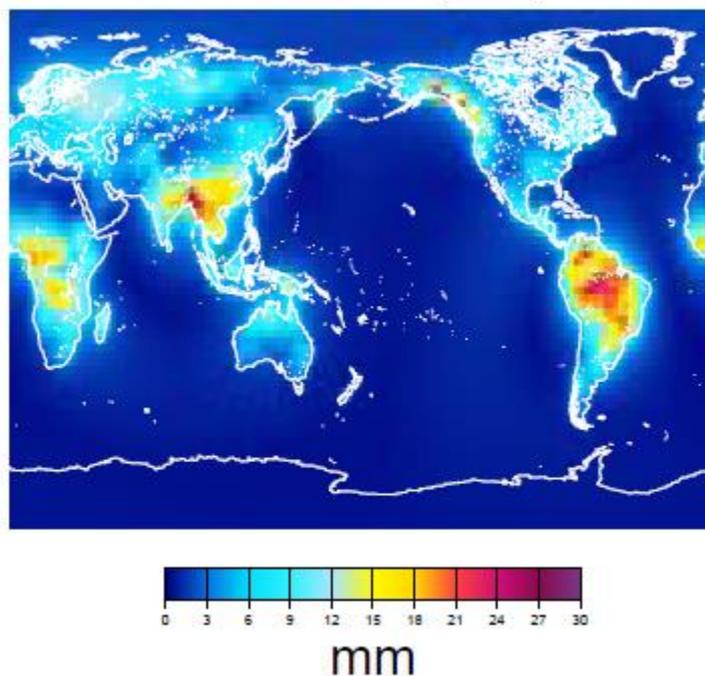


Figura 2.8 - Deformação vertical da crosta causada por carga hidrológica (Fonte:VAN DAM *et al.*, 2001).

No entanto o trabalho de BEVIS *et al.* (2005), mediante 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). Considerou, ainda, por meio 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 entre a variação vertical oriunda da carga hidrológica e a decorrente da carga atmosférica, o que pode levar a distorções da ordem de 1,6 mm (Figura 2.8), causadas em função da carga atmosférica e descritas no item que segue do texto.

No trabalho realizado por MOREIRA (2010), variações da coordenada vertical, causadas, principalmente, por carga hidrológica, foram detectadas nos locais de levantamentos de dados GNSS. Essas variações foram detectadas no tempo e no espaço e afetam, de maneira significativa (em torno de 10 centímetros), a bacia Amazônica. Por essa razão, a determinação dos fenômenos de carga e correspondente correção são fundamentais para correta avaliação e aplicação de dados de geodésia nessa bacia, sendo aconselhado o monitoramento desse fenômeno com o suporte de técnicas

geodésicas como o uso dos dados derivados do satélite GRACE e dados GNSS. No estudo desta tese, foram analisadas as variações verticais causadas por carga hidrológica. Na Figura 2.9, pode-se observar a amplitude desse fenômeno de carga hidrológica em estações permanentes da bacia Amazônica; maiores detalhes sobre efeitos de carga e suas correções serão apresentados no Capítulo 3.

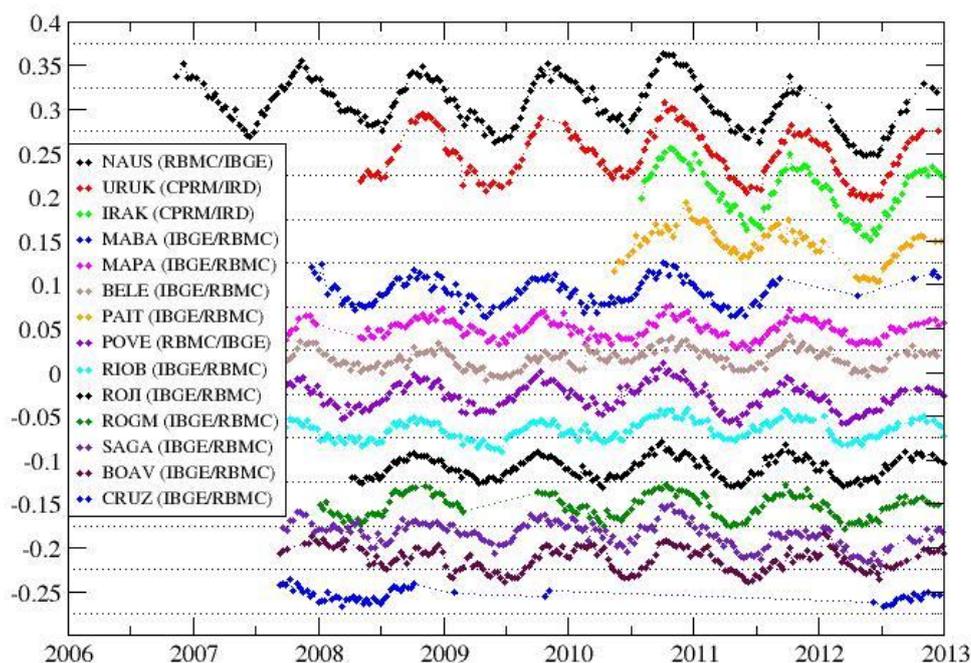


Figura 2.9 – Movimentos verticais nas estações GNSS da bacia Amazônica causadas por carga hidrológica e detectadas na presente tese.

Pode-se notar, nas séries de coordenadas verticais processadas das estações GNSS, descritas na Figura 2.9, que todas as variações verticais estão bastante correlacionadas no tempo e no espaço, tendo sua amplitude máxima nas proximidades da estação NAUS de Manaus, com redução de amplitude conforme a distância em relação ao ponto de maior amplitude, causadas por carga hidrológica.

Com a geração de séries a partir dos dados das estações GNSS em conjunto com as séries de deformação crustal do satélite GRACE, foi possível, neste estudo, estimar os valores e a amplitude da deformação crustal na bacia Amazônica. As séries geradas indicaram que os efeitos de deformações crustais causados por carga hidrológica são a

maior fonte de erros não modelados no processamento de dados de estações GPS nessa região da bacia Amazônica, o que justifica a necessidade de correção desse fenômeno com objetivo de atingir precisão centimétrica no uso e no levantamento de dados oriundos a partir de tecnologias geodésicas.

2.2 Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS)

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 terrestre por satélite, inclusive o sistema GPS, em conjunto com os satélites russos GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), com o sistema europeu GALILEO, com o sistema japonês QZSS, com o sistema indiano IRNSS e com o sistema chinês COMPASS. No momento atual, estão operacionais, em todo o globo, apenas os sistemas GLONASS e GPS.

Nos dias atuais, os sistemas GNSS permitem o posicionamento no nível global com uma precisão e exatidão única. Quando usadas, de forma precisa, as medidas de fase, se combinadas em observações diárias, podem permitir determinar a posição de uma estação em qualquer lugar da Terra com precisão melhor do que 5 mm na horizontal e com 1cm na vertical. Caso se deseje obter a posição em um determinado instante, no modo em que chamamos de cinemático, é possível atingir a precisão de 1 cm na horizontal e 3 cm na vertical.

Todos os sistemas GNSS são baseados em recepção de sinais de frequência na faixa do espectro eletromagnético de microondas, mais especificamente na banda L, que são enviados por satélites GNSS e recebidos por receptores. Em linhas gerais, a posição da localização da antena do receptor é estimada por meio do uso do tempo de propagação dos sinais enviados por cada satélite para o receptor e segundo a órbita estimada de cada satélite. No entanto, para essas estimativas, há questões complexas envolvidas, como sistemas de tempo, propagação e refração de sinais, processamento e combinação de sinais, correções geofísicas e de observação.

Os GNSS são baseados em três segmentos, a saber: espacial, controle e usuários.

O segmento especial consiste nos satélites GNSS, que orbitam perto de 20.000 km acima da superfície terrestre. Cada GNSS tem sua própria constelação de satélites, configurados em órbitas de acordo com a cobertura desejada.

O segmento de controle é formado por estações de monitoramento espalhadas pelo globo. 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.

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

Detalhes técnicos dos segmentos espaciais e de controle podem ser encontrados em várias referências e livros textos a citar HOFMANN-WELLENHOF *et al.* (2008) e SEEBER (2003).

2.2.1 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 segmento espacial do sistema GPS 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).

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 distância 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 a 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 relativas 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 no 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 podem ter 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.

As equações das observáveis GPS de código e fase podem ser escritas da seguinte forma (LOYER S. 2007) conforme Equações 2.3 e 2.4.

- Medidas de código (2.3)

$$P(fi) = c * (\tau_{geom} + \tau_{iono}(fi) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c * (\Delta Tr - \Delta Te) + \Delta \tau_p + \theta_p$$

- Medidas de fase (2.4)

$$L(fi) = c * (\tau_{geom} - \tau_{iono}(fi) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c * (\Delta Tr - \Delta Te) - \lambda_i * Ni + \lambda_i * W + \gamma * \Delta \tau + \theta_l$$

sendo:

- $P(fi)$ – medida de pseudo-distância, em metros, entre o satélite e receptor r;
- $L(fi)$ – medida de fase em metros entre o satélite e receptor r;
- c - velocidade da luz ;
- τ_{geom} - tempo do trajeto geométrico entre o centro de fase das antenas do satélite e do receptor;
- $\tau_{iono}(fi)$ – atraso do sinal na ionosfera;
- τ_{tropo} – atraso do sinal na troposfera;
- τ_{relat} - correções de relatividade geral;
- ΔTr e ΔTe - atraso dos relógios do receptor e emissor em relação a uma escala de tempo internacional;
- λ_i - Comprimento de onda ($\lambda_1 = 0,19m$, $\lambda_2 = 0,244m$);

- N_i – número de ciclos inteiros não medidos pelo receptor;
- W – correção de phase windup;
- $\Delta\tau_p$ e $\Delta\tau$ - erro sistemático eletrônico nas medidas de código e fase;
- θ_p - ruído das medidas de código (20 a 30 cm por receptores geodésicos);
- θ_l - ruído das medidas de fase (5 mm).

2.2.2 GLONASS

O sistema GLONASS, segundo o endereço eletrônico de internet <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>, originou-se com base no sistema de navegação por satélites de baixa órbita denominado de “Cicada”. Esse sistema possuía satélites colocados em órbitas circulares com 1000 km de altitude e inclinação de 83 graus distribuídos igualmente em planos orbitais com o Equador e permitiam que o usuário obtivesse posição a partir de 5-6 minutos do início da observação desses satélites. O sucesso da navegação por satélites de baixa órbita levou à evolução do sistema para alcançar um maior número de usuários. Em 1982, foram realizados os primeiros lançamentos da constelação GLONASS, sendo que, somente em 1995, alcançou sua total capacidade operacional com 24 satélites em órbita terrestre. Os 24 satélites do GLONASS são distribuídos em três planos orbitais inclinados em relação ao Equador a 64,8 graus, possuindo órbitas circulares em altitude de 19.100 km, tendo seu período de revolução em 11 horas, 15 minutos e 44 segundos.

No entanto, nos anos seguintes, a falta de investimento nesta missão levou a constelação de satélites ao declínio, restando, no ano de 2002, apenas sete (7) satélites em operação, algo que é considerado insuficiente para navegação e posicionamento no nível global. Nos anos recentes, a constelação GLONASS foi revitalizada, sendo novamente considerada operacional, possuindo 27 satélites ativos orbitando sobre a superfície terrestre. Seu sistema geodésico de órbitas instantâneas é o PZ-90 “*Parametry Zemli 1990*” (“Parâmetros da Terra 1990”), que, desde 2007, está atrelado ao ITRF, fazendo que, assim, como o WGS84, as constelações GPS e GLONASS possam ser convertidas para o mesmo sistema geodésico.

O sistema GLONASS tem características similares ao sistema GPS, inclusive tendo seus satélites operando em duas frequências, mas possuindo diferenças nos sinais e em suas estruturas. O sistema GLONASS possui a divisão de seus canais por frequências, resultando que as frequências dos satélites GLONASS variem de 1.598,06 e 1.605,38 MHz em L1 e entre 1.242,94 e 1.248,63 MHz para L2. Devido ao fato de cada satélite transmitir dados em uma frequência específica, ocorrem que os sinais sejam afetados por erros sistemáticos de forma diferenciada. Para obter um processamento de precisão esse erro sistemático devido a diferentes frequências, deve-se estimado em etapas que envolvem no processamento de dados dessa constelação.

2.2.3 Erros e efeitos envolvidos nas observações

O posicionamento por satélites, 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 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.

2.2.3.1 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. Já as órbitas finais processadas pelos centros de análise do IGS encontram-se no sistema IGB08, sendo que as diferenças entre os sistemas encontram-se na ordem do centímetro (cm) para o ITRF2008. 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 ($f_{\text{WGS84}} = 1/298, 257223563$, $f_{\text{GRS80}} = 1/298, 257222101$) (VASCONCELLOS, 2003).

2.2.3.2 Erros de relógio do satélite e receptor

Um erro de um (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 frequentemente ajustados pelas estações de controle tendo uma precisão instantânea de 2,5 nanosegundos. O IGS em seus produtos chamados “precisos” 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, obtendo maior a precisão quanto mais rastreados forem os satélites. Como na questão das órbitas, os erros de relógio afetam mais o

posicionamento por ponto preciso (PPP), podendo ser até eliminados em técnicas diferenciais como a dupla diferença de fase (MONICO, 2000), descrita no Capítulo 3.

2.2.3.3 Centros de fase das antenas GNSS

Os centros de fase das antenas dos satélites e dos receptores servem como base das distâncias medidas entre os satélites GNSS e seus receptores. Desde 2006 o IGS fornece aos usuários o arquivo denominado ANTEX para correções necessárias em relação aos centros de fase das antenas de satélites e de receptores de modo que os usuários possam essas correções.

Esses erros são modelados através de duas informações geradas pelo IGS, a primeira delas é chamada PCO (Offset do Centro de Fase) e a segunda denominada PCV (Variações do Centro de Fase).

Para receptores o PCO determina a distância entre o ARP (ponto de referência da antena) e o centro de fase da antena do receptor. O PVC determina correções do centro de fase da antena em relação ao vetor entre o satélite e receptor (azimute e elevação), as correções do PVC são mapeadas considerando que as antenas dos receptores estão orientadas para o norte, portanto no campo para estimar de forma correta essa correção os receptores devem ter suas orientadas corretamente.

Já para os satélites, o PCO indica a distância entre o centro de massa do satélite e o centro de fase da antena do satélite, devido ao fato das órbitas de cada satélite serem estimadas em relação ao a posição do centro de massa de cada satélite. Adicionalmente devem ser estimados os movimentos de atitude do satélite para se determinar corretamente a distância entre o centro de massa do satélite e sua antena.

Para os satélites ainda existe um erro de ajuste chamado *phase-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.

Todas essas correções foram consideradas e corrigidas no processamento dos dados GNSS realizados no GINS , software escolhido para processamento desses dados.

2.2.3.4 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. Para esse trabalho as frequências L1 e L2 foram combinadas de forma a reduzir os efeitos de primeira ordem da ionosfera (que representa até 99.9% dos efeitos).

Esses erros de segunda e de terceira ordem também podem ser eliminados no algoritmo de resolução de dupla diferença de fase (MELANCHROINOS, 2007). Atualmente o sistema GPS também utiliza uma terceira frequência chamada de L5, que pode reduzir os efeitos de segunda ordem da ionosfera, entre outras aplicações, mais ainda se espera que a constelação de satélites com a frequência L5 esteja completa a constelação GPS para poder usar essa correção.

2.2.3.5 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 (2010), existem vários modelos que ajudam a estimar o atraso troposférico, sendo que esses 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).

Neste trabalho no processamento de dados GNSS são utilizados o modelo GMF (Global Mapping Function) (BOEHM *et al.*, 2006) para mapeamento da parte hidroestática e úmida do atraso da troposfera baseando-se na elevação dos satélites. A parte de troposfera seca foi modelada usando Saastamoinen e foram utilizados dados meteorológicos do modelo GPT (*Global Pressure and Temperature*) (BOEHM *et al.*, 2007), seguindo as recomendações do IERS (2010).

2.2.3.6 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 ciclo ainda pode ocorrer mesmo que não ocorra perda de sinal, bastando que ocorra algum problema com a contagem de ciclos de uma das frequências observadas no receptor.

Essa perda de ciclos causa problemas na solução das ambigüidades e deve ser removida através de algoritmos no pré-processamento dos dados.

2.2.3.7 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 telhadas.

O uso de antenas apropriadas, que recebem apenas sinais polarizados da mesma forma que os sinais emitidos pelos satélites, reduzem 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.

2.2.4 Estações permanentes GNSS

As estações permanentes GNSS foram fundamentais para execução desta pesquisa. Através delas, pôde-se adquirir dados de observações dos receptores GPS na área de influência do presente estudo, fato que possibilitou a avaliação dos efeitos de carga e dos métodos de processamento GNSS. 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.

2.2.4.1 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 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 2.10, 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) (DOW *et al.*, 2009).

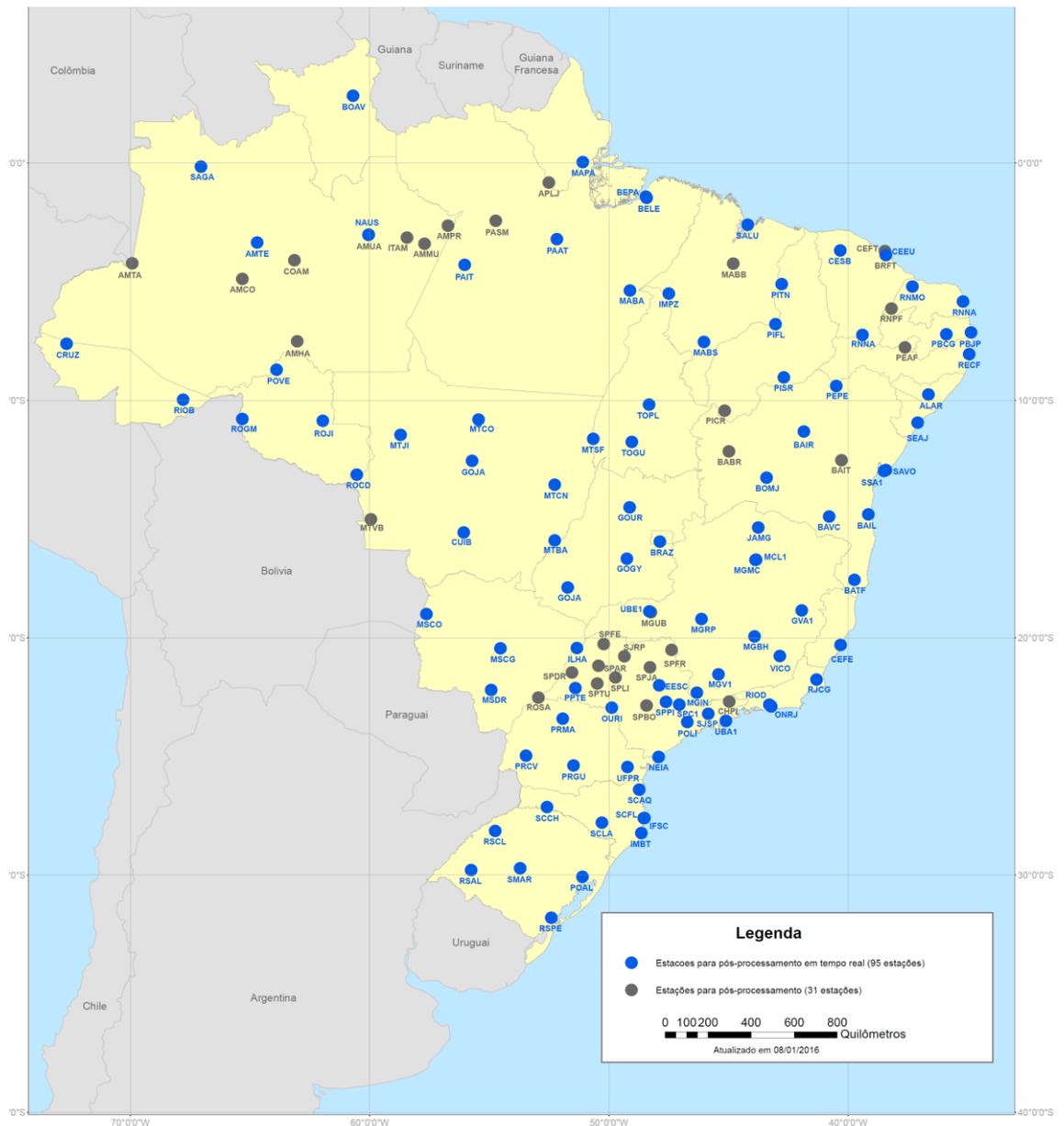


Figura 2.11- Distribuição das estações da RBMC (Fonte: endereço eletrônico do IBGE em www.ibge.gov.br).

O IBGE disponibiliza, em seu endereço eletrônico na internet, os dados de sua rede na taxa de observação de 15 segundos e mantém um sistema chamado RBMC-IP. Nesse sistema, é possível adquirir dados em tempo real na frequência de um (1) segundo, o que possibilita aplicações GNSS em tempo real e aquisição de dados em frequências melhor adaptadas a soluções GPS cinemáticas. Essas soluções cinemáticas, por sua vez, exigem tratamento de dados GPS com estações em movimento, como é o

caso, por exemplo, dos levantamentos GPS sobre embarcação coletados e apresentados ao longo este trabalho.

2.2.4.3 Estações permanentes instaladas no âmbito do projeto Dinâmica Fluvial

Com o objetivo de adensar a rede de estações permanentes GPS e avaliar, com melhor qualidade, a distribuição de movimentos verticais da superfície terrestre, foram instaladas, na bacia Amazônica, as estações permanentes de URUK na cidade de Urucurituba nas margens do rio Madeira (Figura 2.7), a estação permanente de IRAK na comunidade de Iracema no rio Amazonas, a estação de BANA na comunidade de Santa Luzia do Bananal no rio Solimões e a estação de IRBA no município de Iranduba no rio Solimões, conforme dispostas na Figura 2.7.

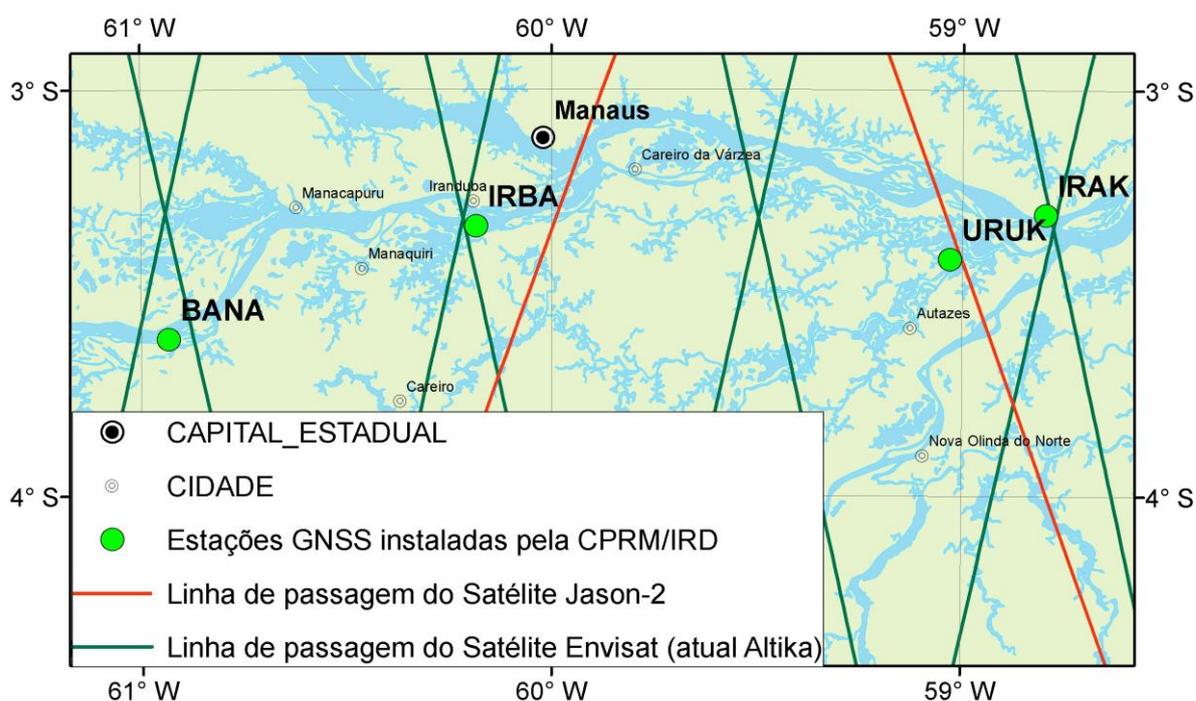


Figura 2.12 - Estações GNSS instaladas pela CPRM no âmbito do projeto de pesquisa Dinâmica Fluvial

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 locais em que ainda é possível perceber alguns afloramentos rochosos, implantando-se, então, uma fundação de concreto com pilar em profundidade de aproximadamente 2 metros. A instalação de novas estações permanentes GPS permite 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.



Figura 2.13 - Estação permanente GPS de URUK na cidade de Urucurituba, nas margens do rio Madeira.

Os dados de todas as estações RBMC 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. Para o procedimento, foi utilizado um pequeno código computacional (*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 das estações URUK, IRAK, IRBA e BANA foram adquiridos diretamente do receptor através das campanhas de campo realizadas durante o tempo deste estudo.

Os arquivos das estações do IBGE vêm em formato RINEX, comprimidos através do compactador ZIP. Os arquivos das estações permanentes instaladas pelo projeto Dinâmica fluvial foram obtidos em formato proprietário da TRIMBLE e foram convertidos para RINEX usando o aplicativo TEQC da UNAVCO (*University NAVSTAR Consortium*), que pode ser adquirido via o endereço eletrônico 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.

2.3 GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*)

A missão espacial GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) é uma missão conjunta entre a agência espacial norte-americana (NASA) e o Centro Espacial Alemão (DLR). Essa missão espacial foi lançada em março de 2002, planejada para durar cinco anos, com objetivo de monitorar e modelar o campo gravitacional terrestre. Atualmente, a missão GRACE continua a coletar dados superando a sua expectativa de vida em mais de 9 anos. 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 do campo gravitacional, 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. Cada satélite possui quatro (4) instrumentos, incluindo um receptor GPS, distanciômetros que operam na frequência de micro-ondas (chamados de KBR- K-band *Ranging System*), câmera estelar e um acelerômetro preciso. O receptor GPS pode rastrear até 14 satélites, obtendo dados em dupla frequência, e tem precisão equivalente aos receptores geodésicos terrestres. Já o distanciômetro na banda K/Ka pode medir a distância entre os satélites com precisão na escala do micrometro, e o acelerômetro tem precisão de 1nm.s^{-2} .

Baseado nesse método, os dois satélites, após várias passagens numa mesma região, são capazes de detectar pequenas variações de gravidade em um mesmo ponto.

Dois modelos são obtidos a partir dos dados GRACE; O primeiro é o campo gravitacional médio (ou estático), que pode ser determinado com uma resolução espacial muito melhor do que qualquer missão precedente. O segundo, a partir das sucessivas observações do satélite sobre a Terra, permite obter tendências na variação gravitacional de longo termo, bem como variações sazonais e sub-sazonais do campo gravitacional.

Essas variações sazonais e sub-sazonais do campo gravitacional estão relacionadas com o transporte de massa no globo terrestre, tendo seu maior impacto sobre os continentes causado pela variação da quantidade de água estocada em uma região, correspondente, mais especificamente, ao ciclo hidrológico terrestre.

No Brasil, as teses de doutorado de ALMEIDA FILHO (2009) e XAVIER (2010) trouxeram excelentes contribuições sobre aplicações hidrológicas do satélite GRACE e podem dar mais detalhes dessa importante missão espacial.

Conforme apresentado no item 2.1.2.4.3 deste capítulo, essa variação de água estocada causa um fenômeno chamado carga hidrológica, que é capaz de deformar a crosta terrestre ocasionando variações nas coordenadas de um mesmo ponto medido no tempo, conforme a intensidade do fenômeno. No caso específico da bacia Amazônica, devido à intensidade do ciclo hidrológico da região, o fenômeno afeta fortemente a precisão dos levantamentos geodésicos realizados. Uma importante contribuição, nesta questão, é o uso dos dados da missão GRACE, que, através conversão das séries de modelagem do campo gravitacional da Terra, expressas em coeficientes do desenvolvimento em séries de funções harmônicas esféricas do potencial gravitacional normalizados, permite obter dados de deformação da crosta terrestre. Nas Figuras 2.14 e 2.15, pode-se observar as variações de deformação na crosta derivadas de dados do satélite GRACE.

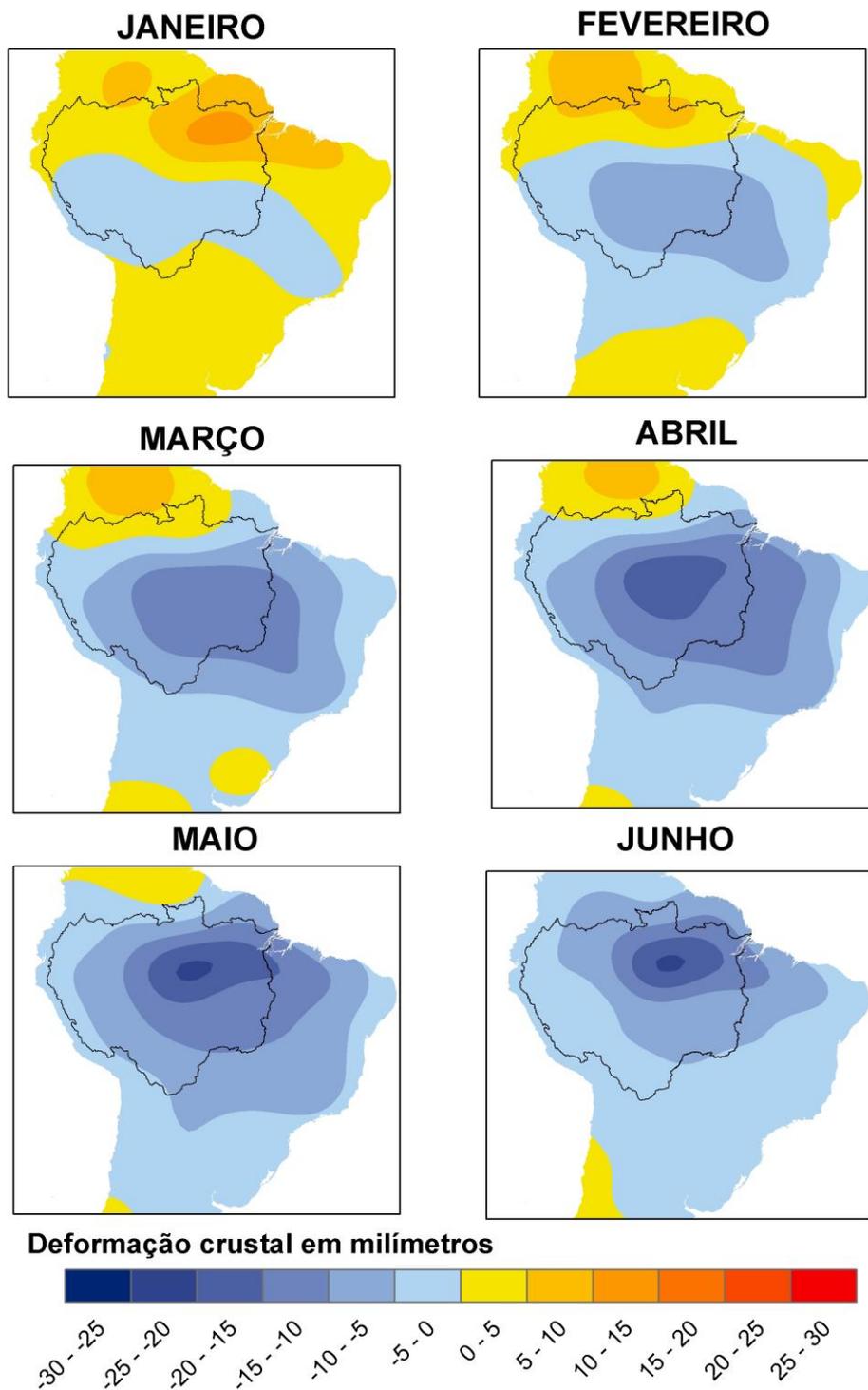


Figura 2.14 - Distribuição espaço-temporal das médias mensais do primeiro semestre da deformação crustal derivadas a partir de 10 anos de dados do satélite GRACE.

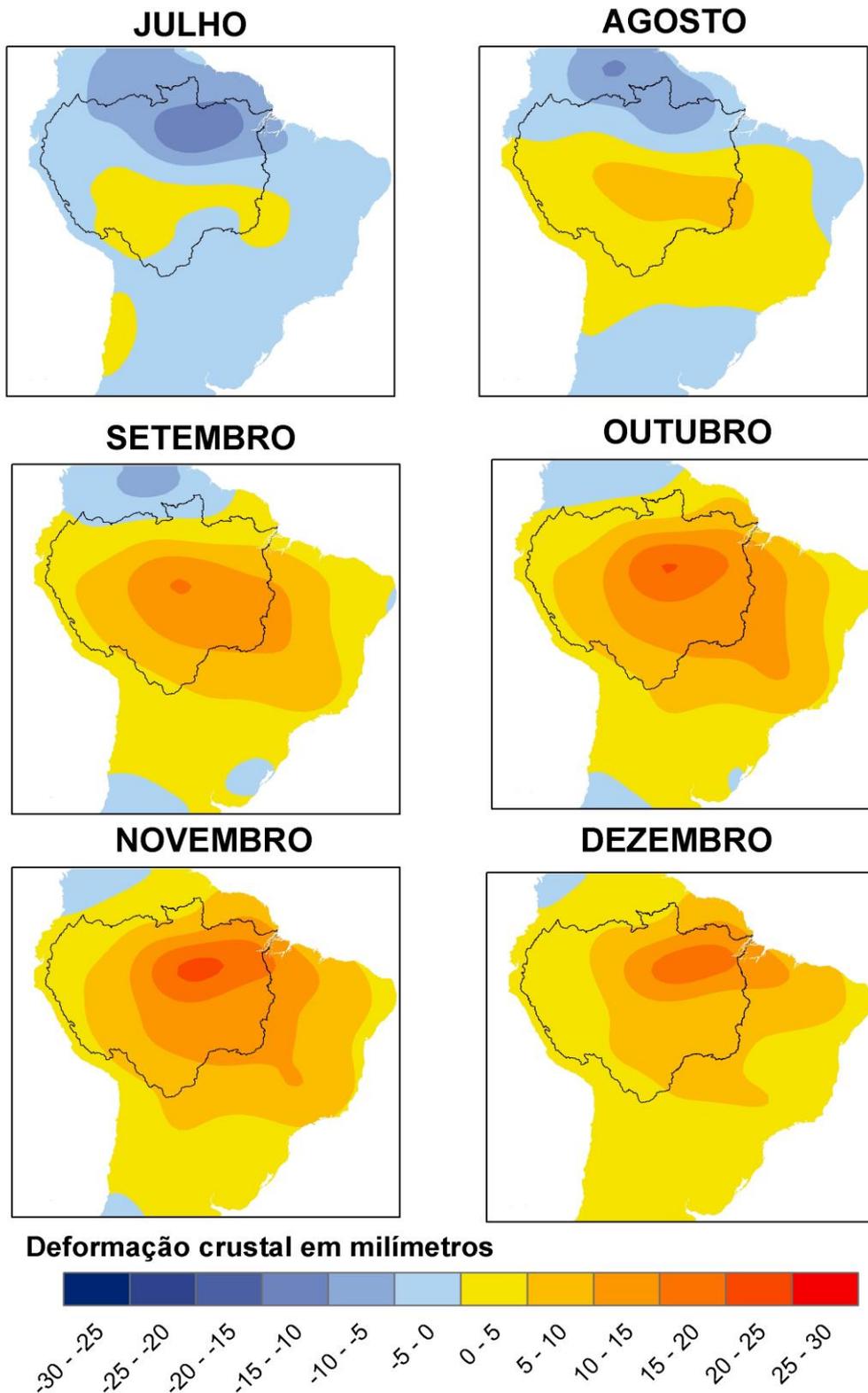


Figura 2.15 - Distribuição espaço-temporal das médias mensais do segundo semestre da deformação crustal derivadas a partir de 10 anos de dados do satélite GRACE.

Neste estudo, obtenção de dados GRACE e conseqüente avaliação da capacidade de uso desse satélite na correção dos efeitos de carga foram realizados, conforme mostrado nas Figuras 2.14 e 2.15. Análises adicionais serão mais bem detalhadas e descritas no Capítulo 3.

2.4 Altimetria Espacial

A altimetria por radar a bordo de satélites, também chamada de altimetria espacial, efetuou seus primeiros passos nos anos 70 do século XX 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, a precisão dos altímetros foi melhorada, alcançando níveis centimétricos, com maior refinamento no cálculo de órbita do satélite, bem como na evolução no procedimento de modelagem dos efeitos atmosféricos que afetam a 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).

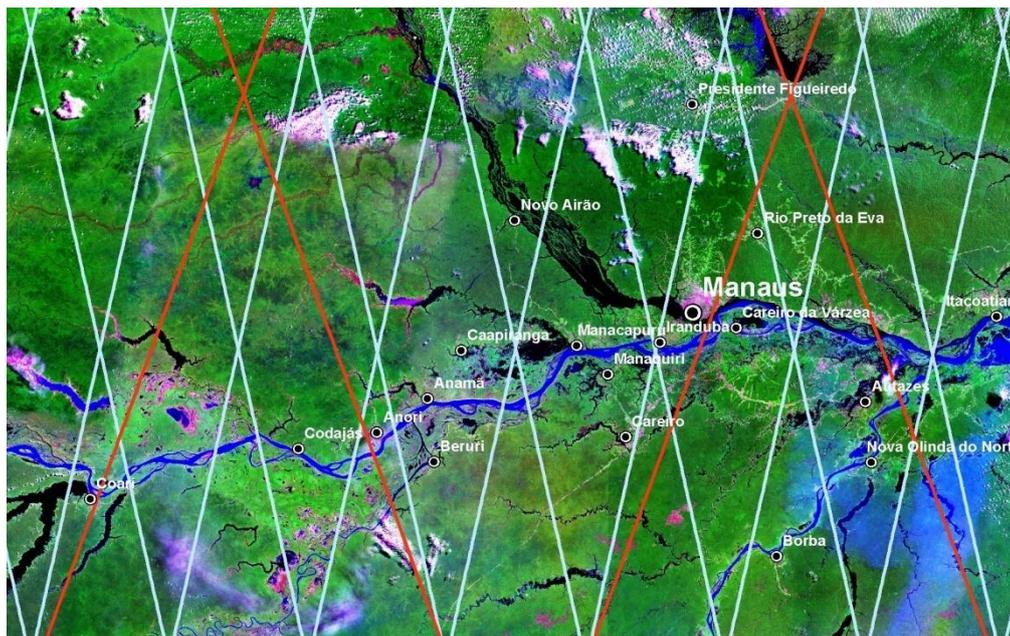


Figura 2.16 - Resolução espacial das trajetórias do Jason 1 e 2 e T/P (linhas em vermelho) e do ERS e Envisat (linhas em branco) em imagem Landsat5-TM com composição das bandas 7, 4 e 2.

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 2.17, 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).

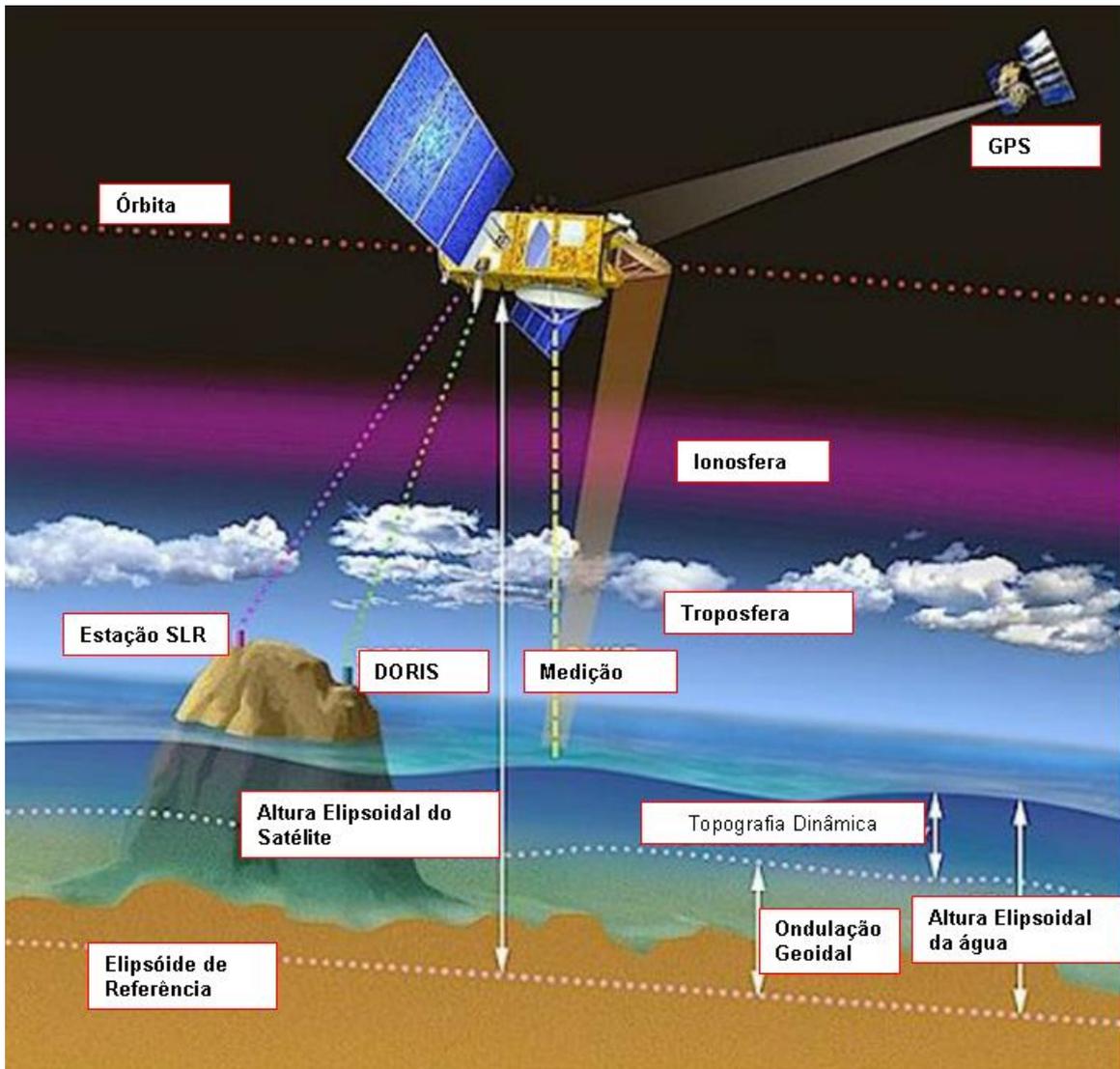


Figura 2.17 - Processo de aquisição do dado de altimetria espacial (Fonte: ROSMORDUC, 2009; adaptado pelo autor para o português).

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.

O tamanho da área de abrangência (*footprint*) é, em geral, entre 2 km² e 10 km², podendo ser maior ou menor em função da rugosidade da superfície líquida, da magnitude e da 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. 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, de geodésia e de 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* no 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 tese.

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.

2.4.1 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 2.18 mostra o exemplo do cruzamento do satélite Envisat com o rio Amazonas e os dados gerados de altimetria espacial nas diversas passagens.

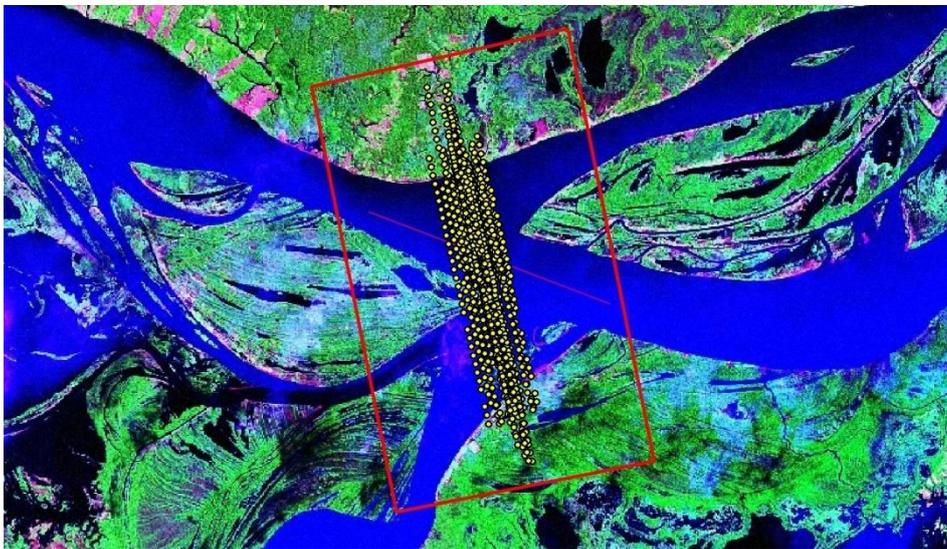


Figura 2.18 - Seleção de dados de altimetria espacial para criação da estação virtual em imagem Landsat5-TM com composição das bandas 7, 4 e 2.

Na seqüência (Figura 2.19), segue o exemplo dos valores coletados das passagens do satélite Envisat no local da Figura 2.18.

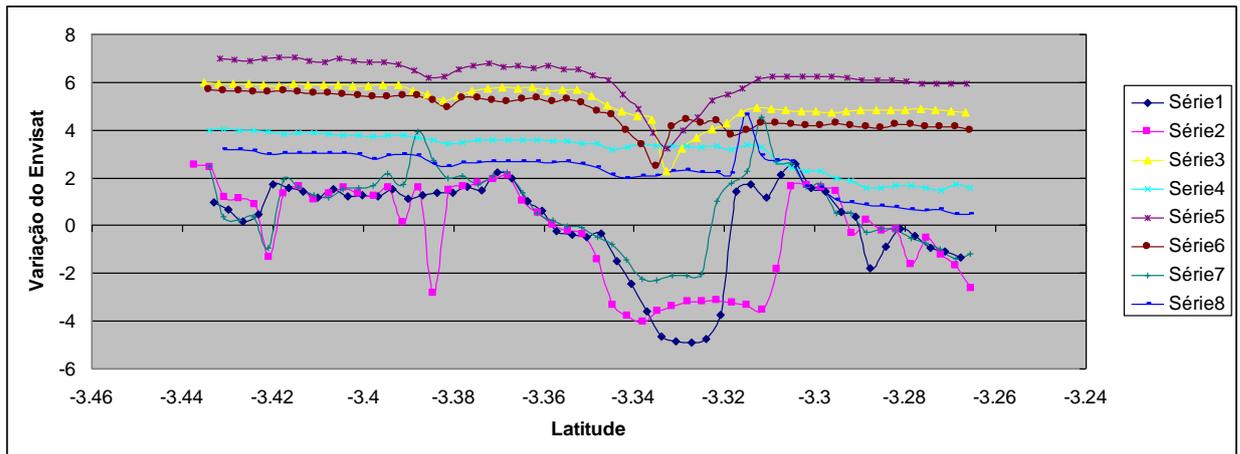


Figura 2.19 - Dados coletados pelo satélite Envisat - cada série representa uma passagem do satélite.

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 configurada nas Figuras 2.18 e 2.19, conforme SILVA (2010).

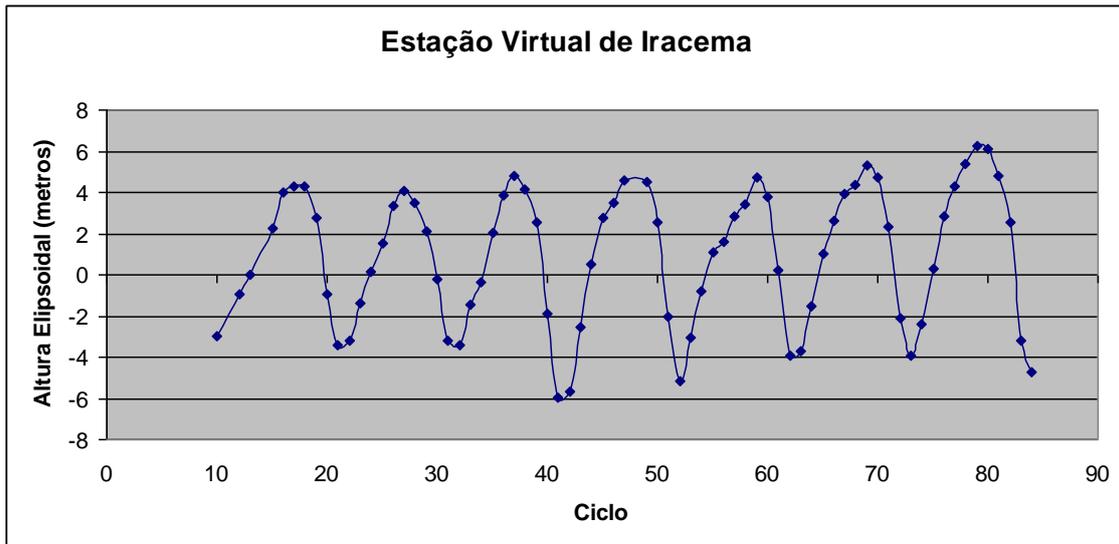


Figura 2.20 - Dados selecionados da série temporal da estação virtual de Iracema-AM (Fonte: SILVA, 2010).

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/>.

Na Figura 2.21, mostra-se a comparação dos dados de satélites altímetros com os dados de réguas linimétricas. No entanto os dois tipos de dados possuem referências altimétricas diferentes, o que impossibilita a avaliação de erros sistemáticos nas séries altimétricas, sendo, então, uma das propostas do presente estudo a unificação da referência altimétrica dessas duas fontes de dados de modo a avaliá-los de forma consistente e adequada.

MANAUS RIO NEGRO

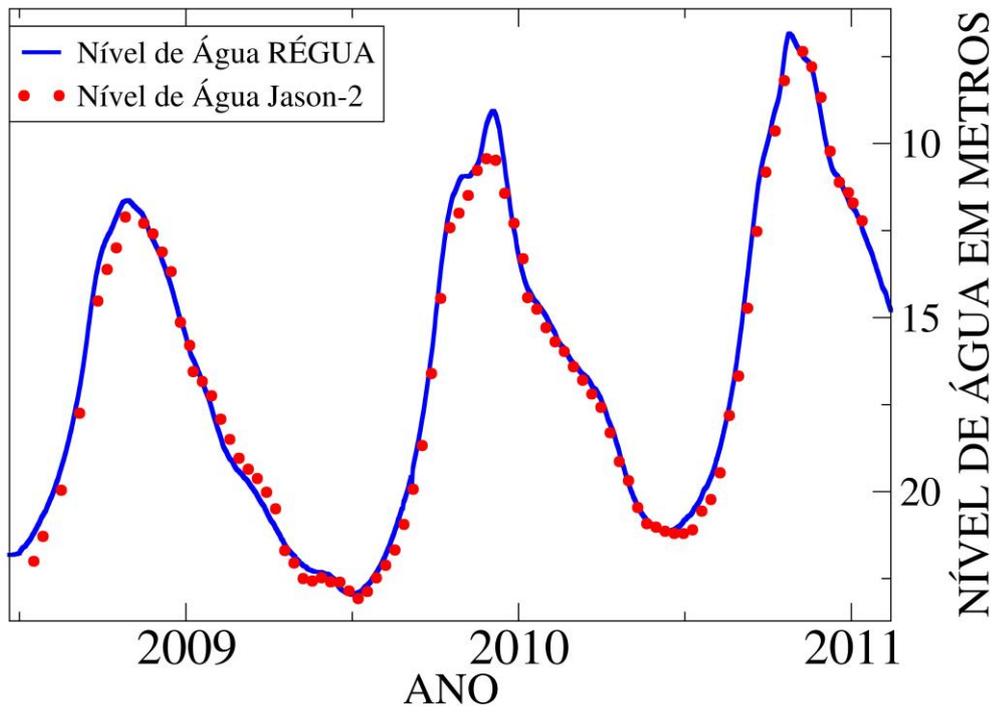


Figura 2.21 - Dados do satélite altímetro Jason-2 na estação de Manaus.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se o arcabouço metodológico concebido para tratar da questão central do estudo no que concerne ao estabelecimento de protocolo de levantamento, processamento e avaliação de dados obtidos através de técnicas geodésicas aplicadas ao campo dos estudos hidrológicos. Destaca-se que a proposta da tese enfoca a aplicação de dados geodésicos como ferramenta de auxílio no monitoramento ambiental e hídrico, com possibilidades de desenvolvimento de estudos hidráulico-hidrológicos na escala da bacia hidrográfica amazônica.

Como suporte para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados os dados de receptores GPS. A partir desses dados, foi estabelecido o referencial altimétrico e a manutenção desse referencial no nível centimétrico, tendo em vista a complexidade inerente dos levantamentos geodésicos e hidrológicos a serem realizados nas estações fluviométricas localizadas na região Amazônia, que apresentam, por sua vez, diferentes graus de dificuldade de acesso para obtenção de dados coletados através de GPS, com vistas, então, a permitir o desenvolvimento efetivamente integrado de pesquisas de modelagem hidráulico-hidrológica e atmosférica na região. Adicione-se a esse desafio o problema da pouca densidade de estações permanentes GPS, em que alguns dos sítios são afetados por mais de dez (10) centímetros de variações de deslocamento vertical, causadas por efeitos de carga hidrológica, conforme anteriormente mencionados nos trabalhos de BEVIS *et al.* (2005) e MOREIRA (2010).

Para o alcance dos objetivos específicos delineados no capítulo introdutório, notadamente de gerar informações a partir de receptores GNSS, que ajudem a melhorar a qualidade dos dados hidrológicos e permitam avaliar a tecnologia de altimetria espacial, é necessário estabelecer e detalhar os seguintes procedimentos que compõem a metodologia que será descrita ao longo do texto deste capítulo, conforme apresentada esquematicamente mediante o fluxograma metodológico ilustrado na Figura 3.1, a saber:

- definir a melhor estratégia de processamento de dados GPS e GNSS;
- modelar fenômenos de deformação crustal que impactam, de forma significativa, os levantamentos geodésicos;

- definir uma estratégia para obtenção da altitude do zero das réguas linimétricas;
- estimar a declividade entre os locais de coleta de dados de nível de água a partir da altimetria por radar a partir de satélites e dados de nível de água obtidos através de réguas linimétricas;
- avaliar dados de altimetria espacial na sua capacidade de medição de cursos de água a partir da comparação com dados de nível de água medidos por estações fluviométricas.

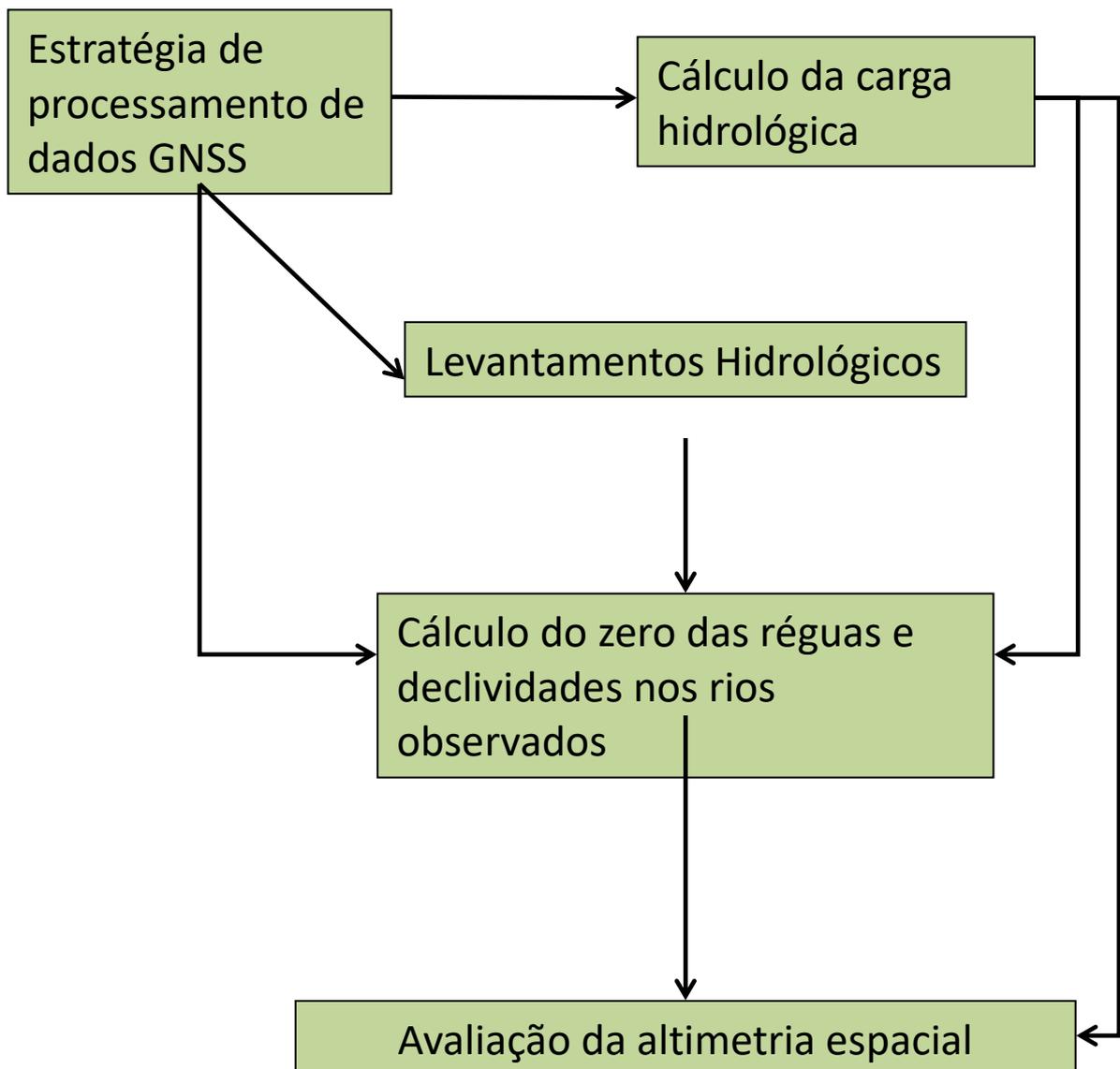


Figura 3.1 – Fluxograma metodológico da tese.

3.1 Definição da estratégia de processamento

Conforme apresentado no Capítulo 2, nos dias de hoje, os Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*) permitem o posicionamento em qualquer lugar do globo terrestre em níveis únicos de precisão e exatidão.

O método de processamento de dupla-diferença de fases é a diretriz mais usual empregada em levantamentos GPS nos modos estático e cinemático. Um dos ganhos dessa estratégia pode ser expresso a partir da eliminação dos erros comuns aos pares de satélites e aos pares de receptores utilizados no processamento e, conseqüentemente, também, a possibilidade de fixação das ambigüidades em valores inteiros. Muitos autores, como BONNEFOND *et al.* (2003a, 2003b, 2010a,b), BOUIN *et al.* (2009a,b), CRETAUX *et al.* (2010, 2011), HAINES *et al.* (2010), WATSON *et al.* (2003, 2004, 2010, 2011), descreveram o sucesso da aplicação do método de dupla diferenças em levantamentos oceanográficos e hidrológicos realizados com o uso de receptores GPS.

Ocorre que o grande problema dessa técnica está no fato de sua precisão ser dependente do comprimento da linha de base utilizada, ou seja, a distância entre a estação de referência e a estação utilizada para o levantamento, uma vez que erros comuns entre satélites e receptores têm suas correlações atenuadas com o aumento do comprimento da linha de base. Além disso, suscita-se um outro problema: as coordenadas obtidas são diferenças entre as coordenadas de entrada da estação de referência e as coordenadas a serem levantadas, ou seja, qualquer erro ou variação das coordenadas da estação de origem implicarão erro sistemático nos dados coletados pela estação a a qual se deseja obter as coordenadas. A essa complexidade, acrescenta-se o desafio de resolver ambigüidades, principalmente, em aplicações cinemáticas com grandes linhas de base, como é o caso de muitos dos dados coletados neste estudo. Na bacia amazônica, a exemplo de algumas localidades onde ocorreram levantamentos a partir de receptores GPS, principalmente locais de estações fluviométricas, como observado na Figura 3.2, pode-se estar a centenas de quilômetros de distância de estações de GPS de referência, o que praticamente inviabiliza o uso da técnica de dupla-diferença para as aplicações desejadas nesta tese.

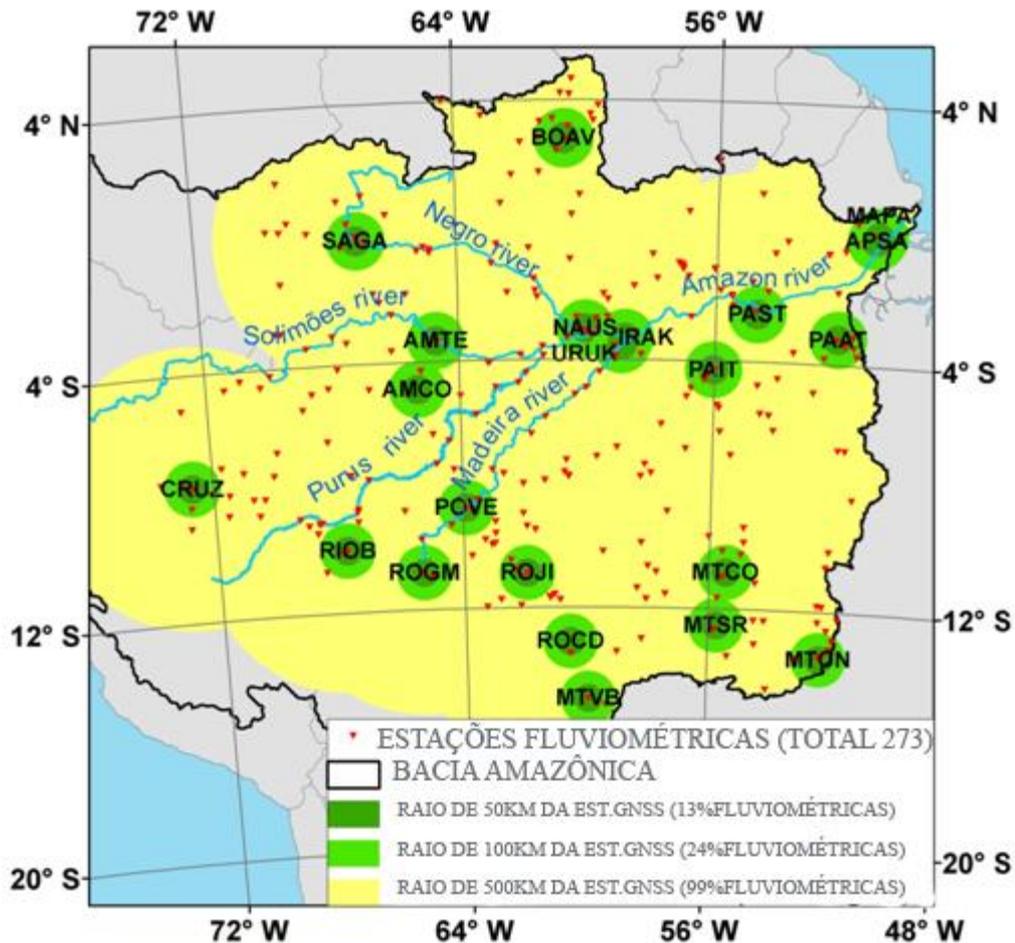


Figura 3.2 - Distribuição espacial das estações GNSS e regiões de influência (buffers) de distâncias das estações GNSS para as réguas e locais de levantamentos geodésicos realizados na bacia Amazônica.

Baseado nessas considerações, este estudo propõe avaliar o método de posicionamento por ponto preciso (PPP) (HEROUX e KOUBA, 1995) como alternativa para o processamento dos dados aqui coletados. O método PPP é pautado pelo processamento não diferencial de dados de dupla frequência, utilizando a informação de código e fases de receptores GNSS. O método de posicionamento por ponto preciso (PPP) permite determinar a posição da estação com o auxílio do uso de órbitas e relógios dos satélites que são estimados pelo centros de análise do IGS. Através de uma rede de estações e de dezenas de centros colaboradores que representam o Serviço Internacional GNSS (IGS), as órbitas e relógios são estimados, através de códigos computacionais científicos, para os satélites da constelação GPS e GLONASS, estando disponíveis para todos os usuários (DOW *et al.*, 2009).

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

As desvantagens do método PPP estão relacionadas ao fato da não eliminação dos erros comuns entre os satélites e receptores. Essa opção resulta nas seguintes penalidades:

- necessidade de conhecer erros sistemáticos existentes em satélites e receptores para fixação das ambigüidades em valores inteiros;
- necessidade de relógios e órbitas estimados por meio de tratamento em código computacional científico mediante o emprego de uma rede global de estações GNSS;
- forte dependência da geometria dos satélites observados;
- grande efeito da modelagem das observações, fato decorrente da não eliminação de erros por diferenciação;
- estimativa durante o processamento dos dados de parâmetros troposféricos e erros do relógio do receptor

A qualidade dos resultados PPP está intimamente ligada à utilização de receptores de dupla frequência, qualidade das órbitas, relógios, modelos de refração troposférica e modelos físicos. Ao utilizar esses critérios e um tempo de observação razoável através das medidas de fase e estimação da ambigüidade em valores 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). WEINBACH (2013) avaliou a precisão do PPP como equivalente a de técnicas de dupla diferença para sessões com duração superior a 12 horas. Nessa lista, incluem-se a avaliação do método PPP cinemático por FUND *et al.* (2012), utilizando bóias

oceanográficas, e o trabalho realizado por MOREIRA (2010), na determinação de uma rede de referência a partir de dados de estações GNSS com longas séries temporais.

Nos últimos anos, um dos grandes desafios do método PPP baseava-se na dificuldade de estimativa dos erros sistemáticos existentes em satélites e receptores, ocasionando a impossibilidade que as ambigüidades estimadas no processamento PPP tivessem valores inteiros fixados, o que pode provocar erros sistemáticos e tendências errôneas nas soluções a serem obtidas. Essa constatação fundamenta-se no fato das ambigüidades estimadas como números não inteiros, durante o tratamento, por mínimos quadrados, juntamente com as coordenadas, relógios do receptor e atraso troposférico. A fixação de ambigüidades em valores inteiros, de forma correta, permite a melhoria da solução dos outros parâmetros.

3.1.1 Método IPPP (PPP inteiro)

Recentemente, foi implementada, no código computacional GINS, utilizado neste trabalho, a ser descrito no item 3.1.2, a possibilidade de utilizar as órbitas e os relógios (“de natureza inteira”) gerados e distribuídos pelo centro de análise do IGS, pertencente ao CNES-CLS, nominado GRGS (LOYER *et al.*, 2012). Ao se utilizar esses produtos geodésicos precisos, adicionados a arquivos de correção dos erros sistemáticos de satélites e receptores, as ambigüidades do método PPP podem ser fixadas para valores inteiros. Essa técnica pode ser nomeada como IPPP (*integer-PPP* ou PPP-inteiro). Na Figura 3.2, pode-se observar o esquema do procedimento metodológico da estratégia IPPP.



Figura 3.3 - Fluxograma da metodologia do procedimento de estimativa de ambigüidades inteiras do código computacional GINS.

Seguindo os fluxos observados na Figura 3.2, tem-se que, a partir do arquivo em formato RINEX (*Receiver INdependent Exchange*) gerado pelo receptor GPS, são obtidas as informações de código e fase dos receptores, descrita na Figura 3.3:

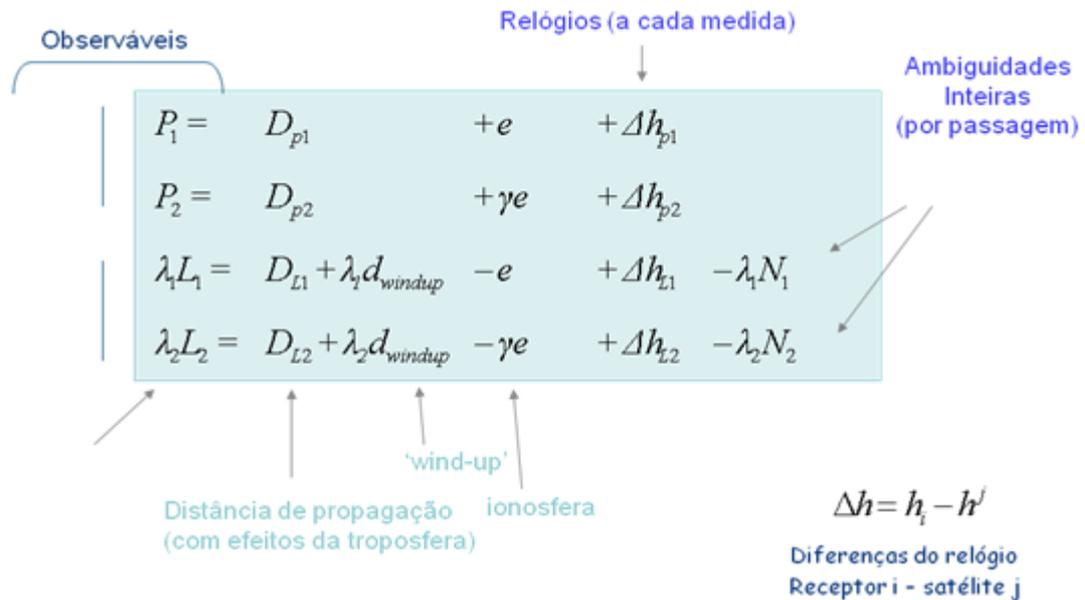


Figura 3.4 – Variáveis observáveis do GPS e suas componentes.

A partir das variáveis observáveis obtidas do arquivo RINEX do receptor GPS, são realizadas combinações lineares das portadoras com longo comprimento de onda (*wide-lane-WL*), descritas na equação:

$$L_2 - L_1 - f(P_1, P_2) = -N_W + (c\tau_{wsb}/\lambda wl) - (c\tau_{wrb}/\lambda wl) \quad (3.1)$$

sendo:

N_W - ambigüidade WL, $N_W = N_2 - N_1$;

λwl - comprimento de onda WL (*wide-lane*) (86,19 cm);

$c\tau_{wsb}/\lambda wl$ - WSB (*wide-lane satellite bias*- erros sistemáticos do satélite);

$c\tau_{wsr}/\lambda wl$ - WSB (*wide-lane receiver bias* - erros sistemáticos do receptor).

Nessa operação, as ambigüidades WL (*wide-lane*) são fixadas em valores inteiros ($N_W = N_2 - N_1$). As ambigüidades WL são utilizadas como entrada nas combinações de fase Iono-Free, que utilizam a equação:

$$\frac{\gamma \lambda_1 - \lambda_2 (L_2 + N_W)}{\gamma - 1} = D + \lambda c d_{windup} + \Delta h_{l3} - \lambda c N_1 \quad (3.2)$$

.sendo:

λc - comprimento de onda da combinação NL (*narrow-lane*) com ionosfera livre (*iono-free*) (λc 10.7cm);

$\gamma = (\lambda_1 / \lambda_2)$, $\lambda_1 = 19,03$ cm e $\lambda_2 = 24,42$ cm;

D - distância de propagação com efeitos da ionosfera.

$\lambda c d_{windup}$ - efeito de *phase-windup* ;

Δh_{l3} - diferenças entre o relógio do satélite e o do receptor na combinação *iono-free*.

De forma simplificada o método propõe-se a aplicar as correções de erros sistemáticos dos satélites (WSB) nas combinações WL (Equação 3.1). Nesse processo, são resolvidas as ambigüidades inteiras WL e estimados os erros sistemáticos do receptor (WRB).

As ambigüidades WL são utilizadas, como entrada, na Equação 3.2 (*iono-free*), sendo realizado o primeiro processamento no GINS, utilizando-se os produtos de natureza “inteira” do GRG; na seqüência, são estimados, por meio do método de mínimos quadrados, as posições, atraso troposférico, relógios dos receptores e ambigüidades da combinação linear das portadoras com curto comprimento de onda, chamadas *narrow-lane* -NL), com comprimento de onda 10,7 cm, ainda em valores não inteiros. Posteriormente, as ambigüidades são fixadas para o valor inteiro mais próximo, usando um método de reamostragem (*bootstrap*) (LOYER *et al.*, 2012).

Após fixadas as ambigüidades NL, é realizado um novo processamento, estimando-se apenas os parâmetros de posição, relógios e atrasos troposféricos.

LAURICHESSE e MERCIER (2009) mostraram que fixar as ambigüidades em valores inteiros melhora as soluções de coordenadas no processamento PPP, impactando

de forma mais forte as soluções nas coordenadas horizontais. Entretanto fixar ambigüidades inteiras para o processamento PPP pode ser extremamente difícil, sendo necessários dados de boa qualidade e sessões longas de observação para realizar essa atividade. Em casos de interrupções de sinais, onde as observações sejam realizadas em períodos de tempo muito curtos para estimar os parâmetros necessários para a fixação de ambigüidades, tal ambigüidade pode ser fixada para um valor incoerente. Um valor incoerente afetará os cálculos das coordenadas, degradando a solução ao invés de aprimorá-la.

Mais detalhes sobre o método IPPP usado no código computacional GINS podem ser encontrados em LAURICHESSE e MERCIER (2009), FUND *et al.* (2012) em LOYER *et al.* (2012).

3.1.2 Código computacional GINS para processamento de dados GPS

Esta seção visa descrever um pouco da história e das funcionalidades do código computacional utilizado neste trabalho para tratamento dos dados GPS em conjunto com procedimentos de avaliação do desempenho dos métodos PPP e IPPP.

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 de dados geodésicos disponíveis.

O GINS é baseado em ajustamento via método dos mínimos quadrados (MMQ). Segundo VASCONCELOS (2003), o MMQ, independente do modelo utilizado, tem se mostrado como solução mais eficiente no problema do ajustamento de observações, por conduzir a uma melhor estimativa da solução do sistema de equações que representa o modelo matemático adotado. Em outras palavras, trata-se de procedimento que torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos mensurados pela diferença entre observações e estimativas do modelo, assumindo-se, em princípio, que os erros não são correlacionados, homocedásticos (com variância constante) e que se distribuam normalmente, de forma que se considerem independentes entre si. O leitor que se interessar por maiores detalhes e por variações do método de mínimos quadrados pode

consultar, por exemplo, as referências bibliográficas de DRAPER e SMITH (1981), GEMAEL (1994) e VASCONCELOS (2003).

O GINS é distribuído gratuitamente pelo CNES (*Centre National d'Études Spatiales*), e as instruções para baixar o código podem ser adquiridas por meio do endereço eletrônico [http://grgs.obs-mip.fr/index.php/eng/recherche /logiciels/GINS](http://grgs.obs-mip.fr/index.php/eng/recherche/logiciels/GINS). O GINS é um código computacional projetado para processar dados de qualquer técnica geodésica, como SLR, VLBI, DORIS GNSS, dados da missão GRACE, GOCE, DSN (*Deep Space Network*), entre outros, que podem ser consultados em MARTY *et al.* (2011).

As primeiras iniciativas de emprego GPS no GINS foram promovidas nos anos 90 do século passado a partir do satélite TOPEX, o qual possuía embarcado um receptor experimental GPS, que era capaz de observar seis (6) satélites simultaneamente para, assim, estimar, 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. 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 de produtos geodésicos precisos dos satélites GPS.

Em 2008, o CNES na sua associação ao CLS (*Collecte Localisation Satellites*) foi declarado como centro de análise do IGS, onde o GINS é utilizado para cálculos de produtos geodésicos precisos para GPS e GLONASS, utilizando, em seus produtos, a sigla nominada GRG.

As mudanças mais recentes têm procurado tornar o GINS operacional para tratamento massivo de dados, como é o caso do satélite CHAMP (lançado em 2000) e dos satélites GRACE (lançados em 2002), que embarcaram os receptores GPS como principal ferramenta de acompanhamento de suas órbitas. 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, como modelos do geopotencial, tomando-se, como exemplo, o modelo GRIM, e, mais recentemente, o modelo EIGEN, bem como para a determinação de parâmetros de rotação da Terra e como ferramenta de análise dos Centros de Serviço Internacional DÓRIS.

O GINS contribui com a experiência do CRC (*IERS Combination Research Centers*), mostrando sua potencialidade no tratamento de várias técnicas geodésicas, combinando, mais precisamente, cinco (5) técnicas 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), conforme configuração ilustrada na Figura 3.4.

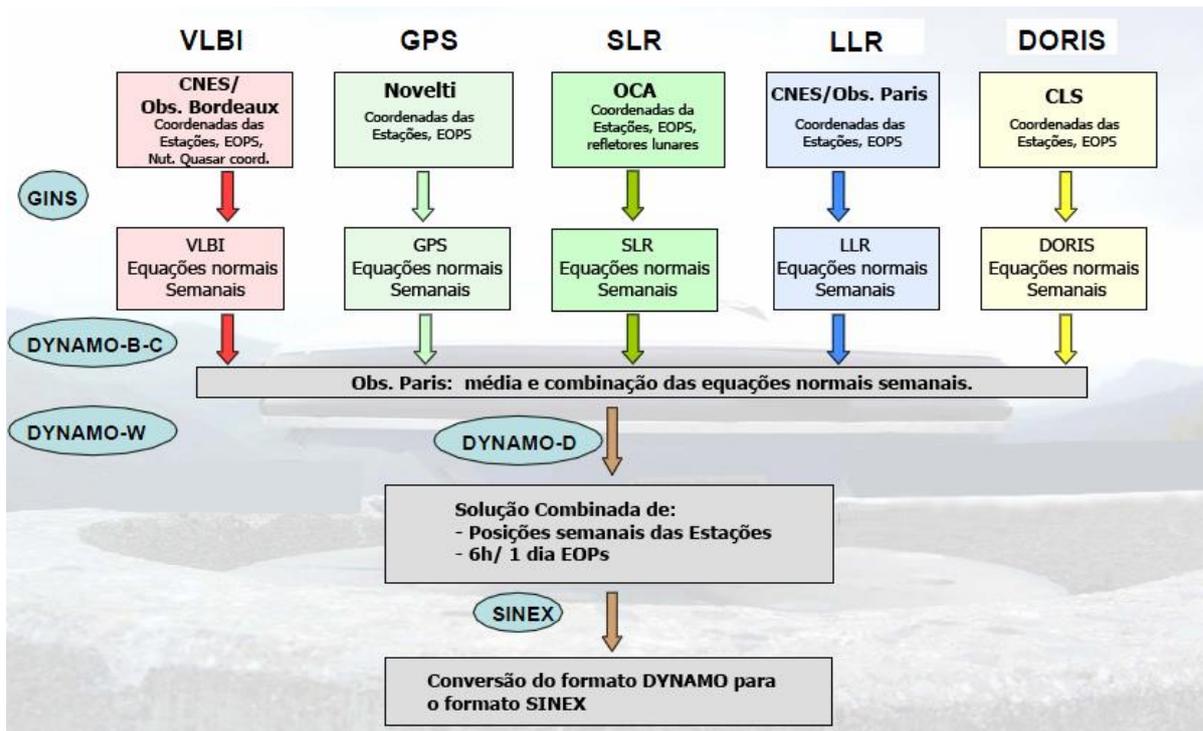


Figura 3.5 - Contribuição do GINS para o CRC (Fonte: PEROSANZ *et al.*, 2008, adaptado pelo autor para português).

No trabalho realizado por MOREIRA (2010), o código computacional GINS do CNES/GRGS mostrou-se uma boa solução no tratamento de dados GPS. Nesse supracitado trabalho, foram realizados mais de 10 mil processamentos de dados obtidos por receptores GPS, comprovando a potencialidade desse código, capaz de fácil automatização e com uma vasta possibilidade de configuração com apoio do emprego de procedimentos de processamento como métodos PPP e dupla diferença, que permitiram uma escolha mais adequada dos resultados. Outros trabalhos mostraram a eficiência do código computacional GINS no processamento de dados PPP. Entre esses trabalhos, destacam-se o monitoramento de variações ocorridas em geleiras (LESCARMONTIER *et al.*, 2012), trabalhos de calibração e validação de dados de altimetria espacial (CRÉTAUX, 2011, 2012), avaliação do método PPP cinemático

(FUND *et al.*, 2012) e processamento de produtos precisos como órbitas e relógios que são fornecidos pelo centro de análise do IGS (Serviço Internacional GNSS) do CNES-CLS (LOYER *et al.*, 2012) .

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

3.1.1.1 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 código *Perl* com versão *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 geodésicos, são enviados, para o servidor do CNES, chamado de BERENICE, uma série de arquivos contidos no computador do usuário, como, por exemplo, as variáveis 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 órbitas e relógios dos satélites e 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 3.5).

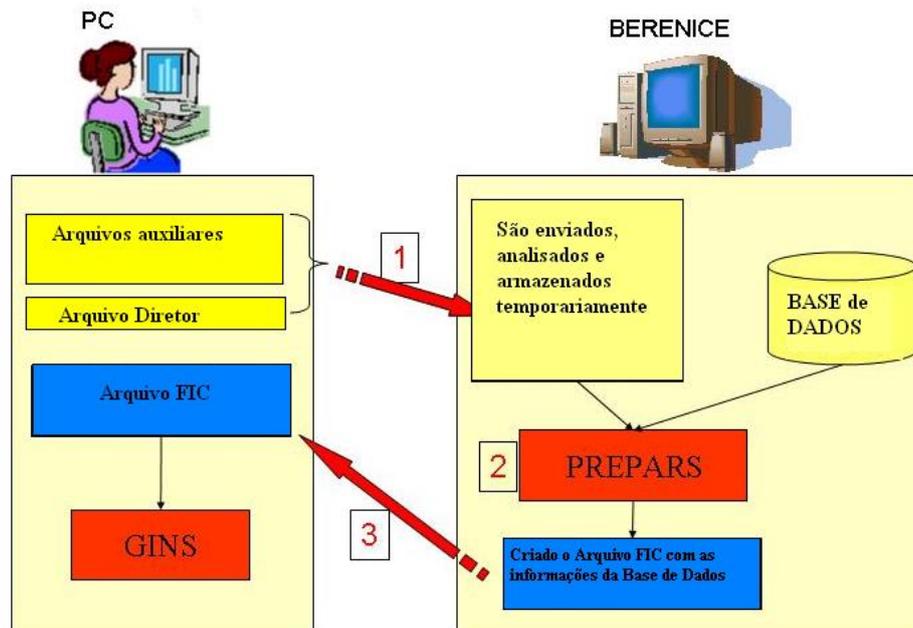


Figura 3.6 - Esquema de envio de dados pelo usuário e pelo servidor do GINS (Fonte: BIANCALE *et al.*, 2008, adaptado pelo autor para português).

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 várias visitas a Toulouse para acompanhamento do trabalho e definição de estratégias de processamento, totalizando meses de treinamento para desenvolver a aptidão necessária para execução do trabalho.

3.1.2 Dados utilizados

As estações permanentes GNSS foram fundamentais para avaliação do método PPP. As estações permanentes possuem longas séries temporais e, em consequência, boas estimativas de suas coordenadas. As estações permanentes GPS são instaladas em locais rígidos, em regiões de afloramento de rochas ou mediante a construção de fundações, que ofereçam estabilidade à estrutura, garantindo a estabilidade do marco e fazendo que o mesmo se movimente somente em conjunto com a crosta terrestre. Assume-se que os principais efeitos de movimento da crosta não modelados são efeitos de cargas hidrológicas e que variações diárias desse efeito podem ser consideradas

nulas. As variações das coordenadas durante uma sessão de observações diárias calculadas pelos diferentes métodos de processamento GNSS poderá ser utilizada para avaliação do método de processamento.

Considera-se que, normalmente, as estações permanentes coletam dados de sinais GNSS no mínimo a cada 30 segundos e que as órbitas e relógios estão disponíveis, nessa mesma taxa de amostragem. Cumpridos esses pré-requisitos, é possível obter, em um dia de observação e posterior processamento desses sinais, soluções de 2880 coordenadas verticais para definir a posição de uma estação permanente, considerando essa estação fixa à crosta. Nesse sentido, o desvio padrão (DESVPAD), que para esse estudo é semelhante à raiz do erro quadrático médio (*root mean square error* - RMSE), das 2880 coordenadas obtidas em um mesmo dia para uma mesma estação, resultará na estimativa de precisão do método de processamento; posteriormente, as diferentes estimativas de precisão de cada método permitirão a escolha do método mais recomendado.

Neste estudo, foram selecionados os dados de oito estações permanentes representadas pelas siglas IRAK, URUK, NAUS, POVE, ROGM, ROJI, APSA e MAPA (ver Figura 3.1 para localização). Ao todo, foram selecionados 15 dias de dados de cada estação, gerando um conjunto de dados de 120 dias para análise comparativa entre as estratégias de processamento de dados GNSS. Essa quantidade de dados foi escolhida de modo evitar que erros espúrios possam contaminar a análise, fazendo que o desvio padrão das 2880 coordenadas obtidas em cada um desses 120 dias indique a melhor forma a precisão do método.

3.1.3 Procedimento de análise dos métodos de processamento

Diferentes testes foram feitos com objetivo de definir a melhor estratégia de processamento de dados GNSS para obtenção de altitude do zero das réguas linimétricas e determinação dos perfis e conseqüentes declividades dos rios amazônicos estudados. A partir das oito estações permanentes escolhidas, adotou-se a diretriz de comparação entre o método de dupla-diferença de fases (DD), o método PPP. O objetivo da comparação foi descobrir a partir de qual comprimento de base, utilizando apenas uma estação de referência, o método PPP passa a ser mais eficiente do que o método DD.

Adicionalmente, a partir das oito estações GNSS permanentes, foram determinadas as melhores formas e práticas para processamento PPP, pois tal processamento pode ser realizado somente com dados GPS, mediante o método de constelações híbridas, usando dados GPS combinados com dados GLONASS, e também utilizando o método IPPP que permite a fixação de ambigüidades inteiras. Para o processamento IPPP, conforme anteriormente informado, existe a necessidade da utilização de órbitas e relógios estimados pelo GRG, produtos esses fornecidos pelo centro de análise do CNES-CLS. Para o processamento híbrido GNSS (GPS+GLONASS), é necessário possuir produtos geodésicos de órbitas e relógios para as duas constelações. Durante o processamento desses dados, apenas o centro de análise da ESA (Agência Espacial Européia- *European Space Agency*) disponibilizara dados para os usuários nessas características.

Em todas as formas de processamento, são adotados os procedimentos descritos a seguir.

Na fase inicial a partir dos arquivos RINEX obtidos dos receptores GNSS, 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). Nesse mesmo processo, os diferentes sinais das observações das estações são combinados usando os métodos de “Melbourne-Wübbena Wide-Lane” (IERS,2010) e Ionosphere-Free (IF) com objetivo de formar as combinações lineares de fase e pseudo-distância.

Posteriormente no caso do método DD, são selecionados os pares de satélites que são visíveis simultaneamente pelas estações a serem utilizadas em dupla diferença; o GINS utiliza algoritmos similares aos do software BERNESE (manual versão 5, que pode ser obtida em <http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>).

Para os métodos DD e IPPP, são feitos os dois procedimentos: inicialmente, estimativa das ambigüidades wide-lane (WL) e, posteriormente, estimativa das ambigüidades narrow-lane (NL).

São realizadas correções de troposfera seca através do modelo GPT (*Global Pressure Temperature*) (IERS, 2010), enquanto o atraso troposférico zenital (ZTD), causado pela parte úmida da troposfera, é estimado usando o modelo GMF (*Global Mapping Function*) (IERS,2010). Os centros de fase das antenas dos satélites e receptores foram corrigidos utilizando o arquivo ANTEX08 (IERS,2010), sendo realizadas, também, diversas correções geofísicas e de observação segundo as recomendações do IERS, conforme descrito no Capítulo 2.

Durante o processamento dos parâmetros a serem ajustados no GINS pelo método de mínimos quadrados, pode-se acompanhar informações dos processos envolvidos em cada iteração até a convergência. Podendo observar o número de medições eliminadas de cada satélite em cada iteração, os resíduos de cada parâmetro estimado nas iterações até a convergência.

Por fim são obtidas as soluções das coordenadas na rede de referência IGB08, que é alinhado no ITRF2008 (ALTAMIMI *et al.*, 2011). O nível de consistência entre esses dois sistemas é superior a 1 cm; em consequência, todas as coordenadas geradas podem ser consideradas atreladas ao ITRF2008 no nível centimétrico de precisão, sendo apresentadas em coordenadas geográficas segundo valores de latitude, longitude e altitude elipsoidal.

Nos itens abaixo são expressos de forma reduzida os procedimentos utilizados durante o processamento de dados GNSS.

Pré processamento dos dados:

- 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, observada de acordo com o arquivo IGS08.atx;
- para o centro de massa do satélite e calibração do centro de fase de sua antena de acordo com o IGS08.atx.

Correções Atmosféricas

- para a troposfera, foram utilizados dados do GPT/GMF;
- 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 em relação aos valores do modelo ITRF2008;
- modelo completo de marés terrestres de acordo com as convenções do IERS (2010); maré polar aplicada de acordo com IERS (2010) e pólo médio de $m_1=0,065$; $m_2=0,330$ arcsec;
- carga oceânica, com amplitudes e fase dadas pelo FES2004 (LYARD *et al.*, 2006).

3.1.4 Resultado da avaliação do PPP

Utilizando as estações permanentes NAUS, URUK, POVE, ROGM, ROJI, APSA e MAPA, localizadas na Figura 3.1, foram, primeiramente, calculadas as séries de coordenadas dessas estações no modo PPP utilizando a estratégia de solução de ambigüidades inteiras. Essas estações foram processadas a partir de dados em uma taxa de amostragem de 30 segundos para sessões de 24 horas, obtendo-se assim soluções de

coordenadas a cada 30 segundos, gerando a exemplo 2880 soluções de coordenada vertical para cada sessão de 24 horas.

Na segunda etapa, as soluções de coordenadas obtidas de cada estação a cada 30 segundos de cada sessão de 24 horas no PPP foram diferenciadas em relação à solução PPP de outra estação que é escolhida como estação de referência, o que recebe o nome de uma solução diferencial PPP (DPPP) (FUND *et al*, 2012). Essas soluções diferenciais PPP (DPPP) foram comparadas com as soluções de coordenadas em dupla diferença (DD).

A análise foi feita baseada na seguinte hipótese, por se traterem de estações permanentes supostamente fixas sobre a crosta, tendo as variações da crosta e efeitos de observação corretamente modelados, as soluções de coordenadas obtidas caso isentas de erros deveriam ter seus valores semelhantes em todas as soluções obtidas. Portanto quando analisadas as soluções de 30 segundos em uma sessão de 24 horas, a variação das soluções obtidas, vistas através do desvio padrão (DESVPAD) permite avaliar as incertezas das soluções quanto ao método de processamento selecionado.

As duas técnicas DPPP e DD foram comparadas em linhas de base com comprimento de 14, 29, 138, 142, 278, 319, 451 e 759 quilômetros. Cada linha de base teve ao menos 11 dias de dados formando, no total, 120 dias de análises para a avaliação entre os métodos PPP e DD. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 3.6.

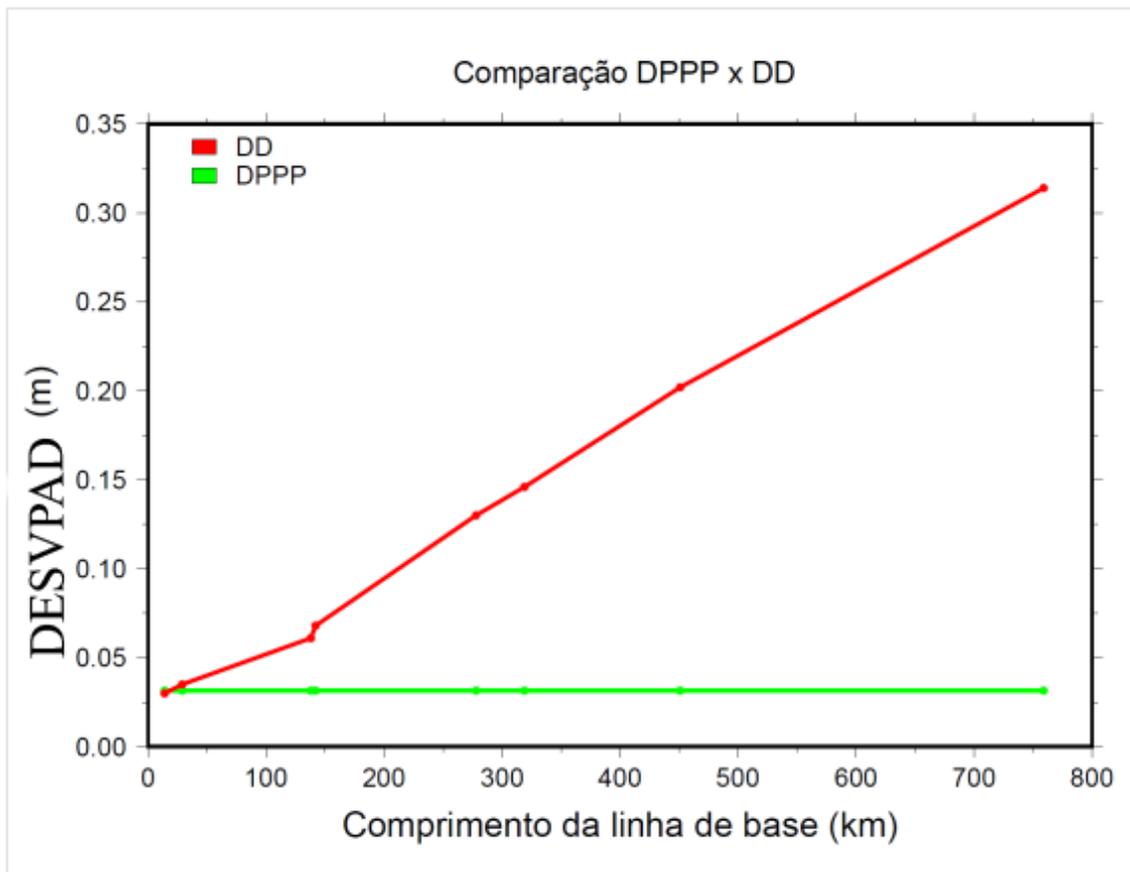


Figura 3.7 - Comparação entre os métodos DD e DPPP para o processamento GPS em diferentes linhas de base.

Enquanto a solução de coordenada vertical do método DPPP teve como resultado do desvio padrão (DESVPAD) o valor de 34 mm +/-5mm, o método DD teve valores crescentes para o seu DESVPAD, como esperado, na medida em que se aumentou o comprimento da linha de base. O desvio padrão do método DPPP e DD foram quase equivalentes para a linha de base de 28 km; nessa linha de base, o método DD obteve o DESVPAD de 35 mm +/-5 mm. Esse resultado permitiu avaliar que, para linhas de base superiores a 28 km, no caso de emprego de técnicas clássicas como a dupla diferença quando ao se utilizar apenas uma estação de referência, o método de PPP seria mais indicado para obter uma maior precisão nas soluções de coordenadas. Esse resultado mostrou-se consistente com o resultado publicado por FUND *et al.* (2011).

As estações GNSS de POVE, NAUS, RIOB, ROGM e ROJI também foram processadas usando diferentes estratégias do método PPP, de forma a avaliar o impacto na busca pela melhor configuração de processamento nesse método. Foram então

processados no GINS em PPP, utilizando as órbitas e relógios GRG, com ambigüidades estimadas em valores não inteiros e com a nova estratégia disponível no código computacional GINS-PC, que é a estratégia de fixação de ambigüidades em valores inteiros, chamado de IPPP. Em adição, foram comparadas ao processamento híbrido de constelações GNSS (GLONASS+GPS). Para esse caso, foi necessário utilizar as órbitas/relógios da ESA, pois essas órbitas são as únicas que, no momento, possuem dados precisos da constelação GLONASS em taxa de amostragem de 30 segundos, que foi escolhida para análise. Os resultados dessa comparação podem ser observados na Figura 3.7 para as coordenadas verticais e, na Tabela 3.2, para todas as coordenadas.

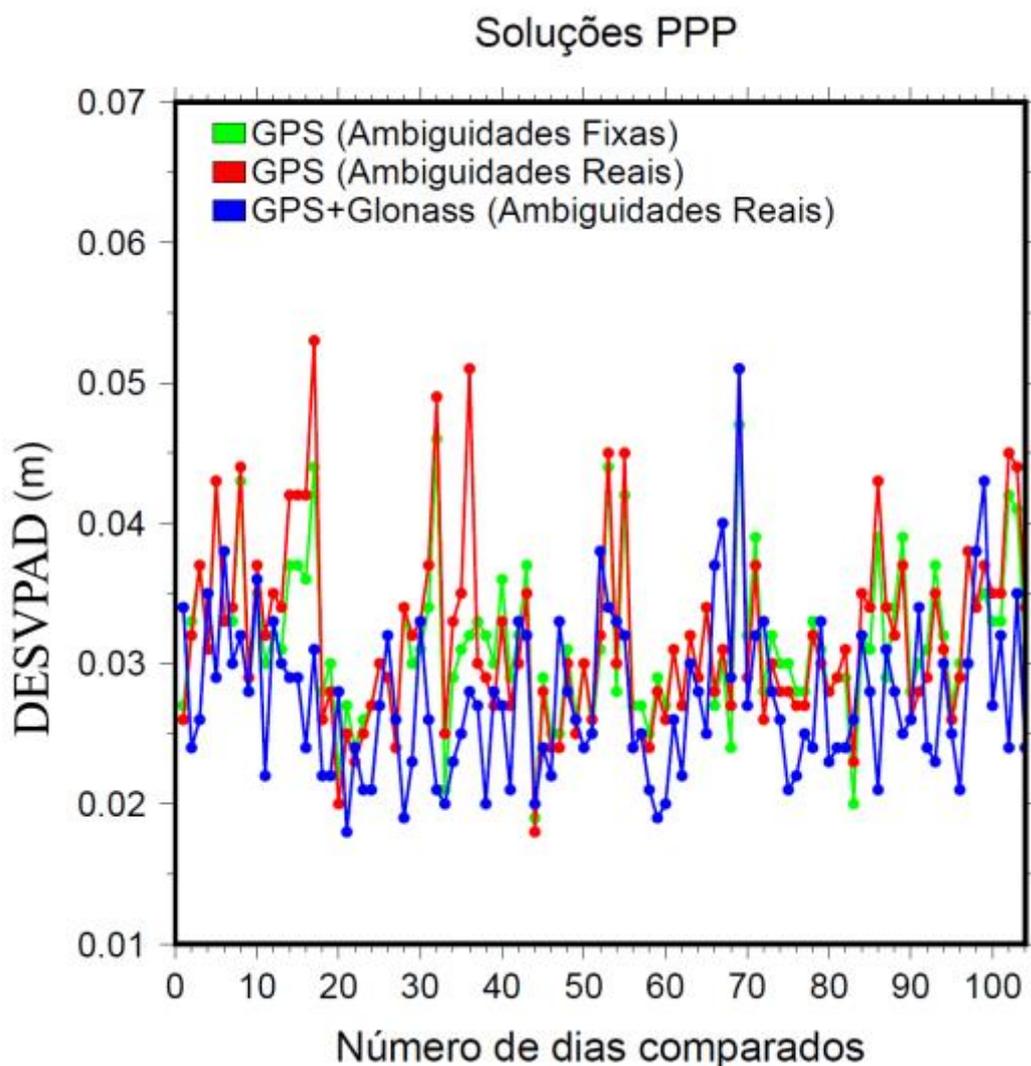


Figura 3.8 - Comparação do desvio padrão em metros obtido na coordenada vertical entre as diferentes estratégias de processamento do método PPP.

Tabela 3.1 - Precisão da posição em milímetros estimada pelo método PPP para as diferentes estratégias de processamento

MÉTODO	NORTE	LESTE	ALTURA
PPP (GPS)	10	12	32
IPPP (GPS)	4	9	31
PPP (GPS +GLONASS)	9	10	27

As estratégias de processamento do método PPP indicam que o processamento IPPP impacta, de forma mais significativa, os erros aleatórios nas coordenadas horizontais. Por outro lado, o aumento da constelação de satélites, ao se adicionar dados do GLONASS, reduz, em parte, erros de geometria que impactam, de forma significativa, o processamento de coordenadas verticais. No entanto, erros de órbitas e relógios, possíveis quando da adição da constelação GLONASS, e erros pela fixação de ambigüidades em valores reais podem causar erros sistemáticos nas soluções, sendo assim não observados na análise anterior do DESVPAD. Nas Figuras 3.8 a 3.10, foi realizada a análise de estabilidade das soluções absolutas por cada método de processamento para verificar a existência dos erros sistemáticos de cada solução.

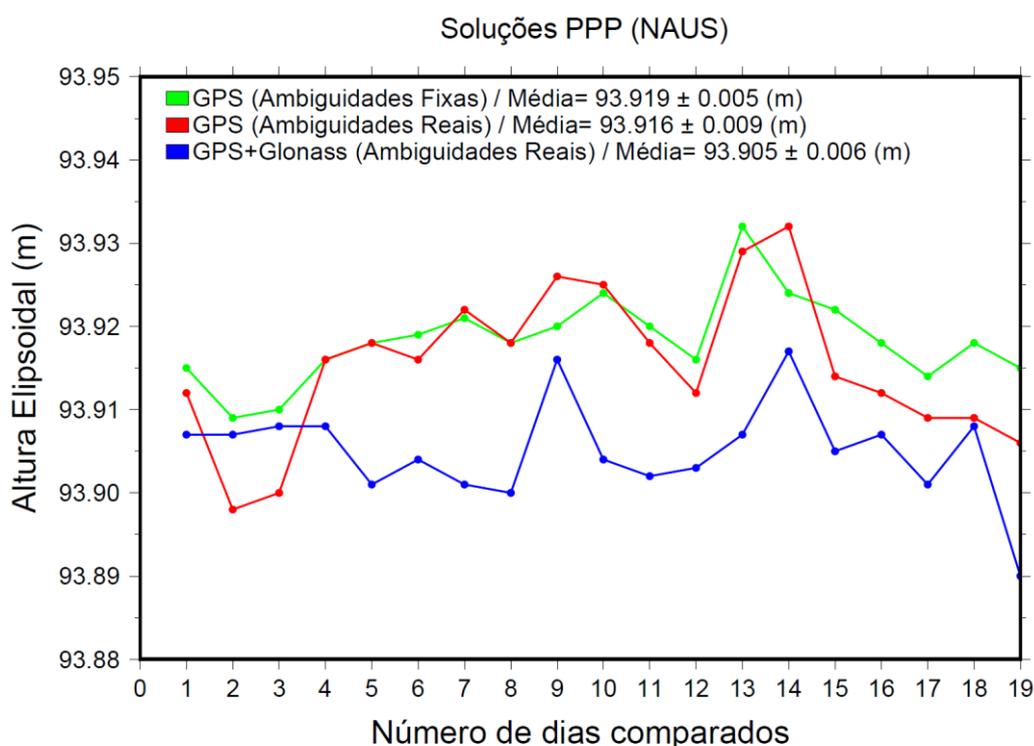


Figura 3.9 - Valores de altitude elipsoidal para a estação NAUS utilizando diferentes estratégias de processamento PPP em diferentes datas.

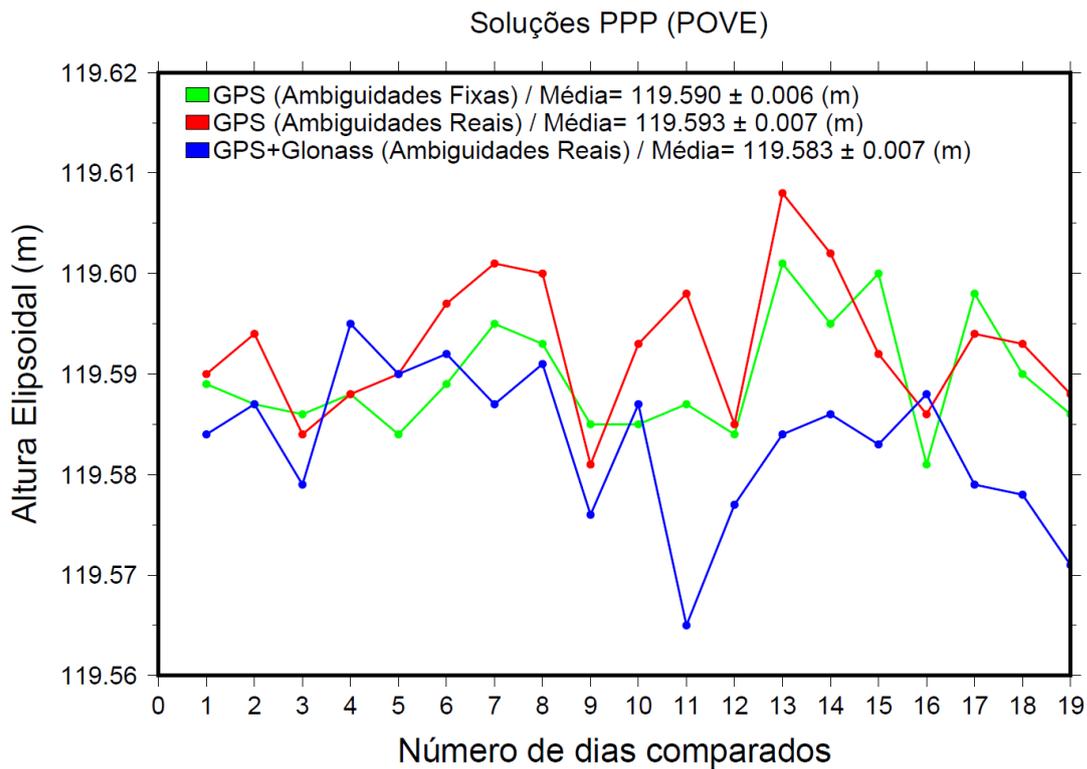


Figura 3.10 - Valores de altura elipsoidal para a estação POVE utilizando diferentes estratégias de processamento PPP em diferentes datas.

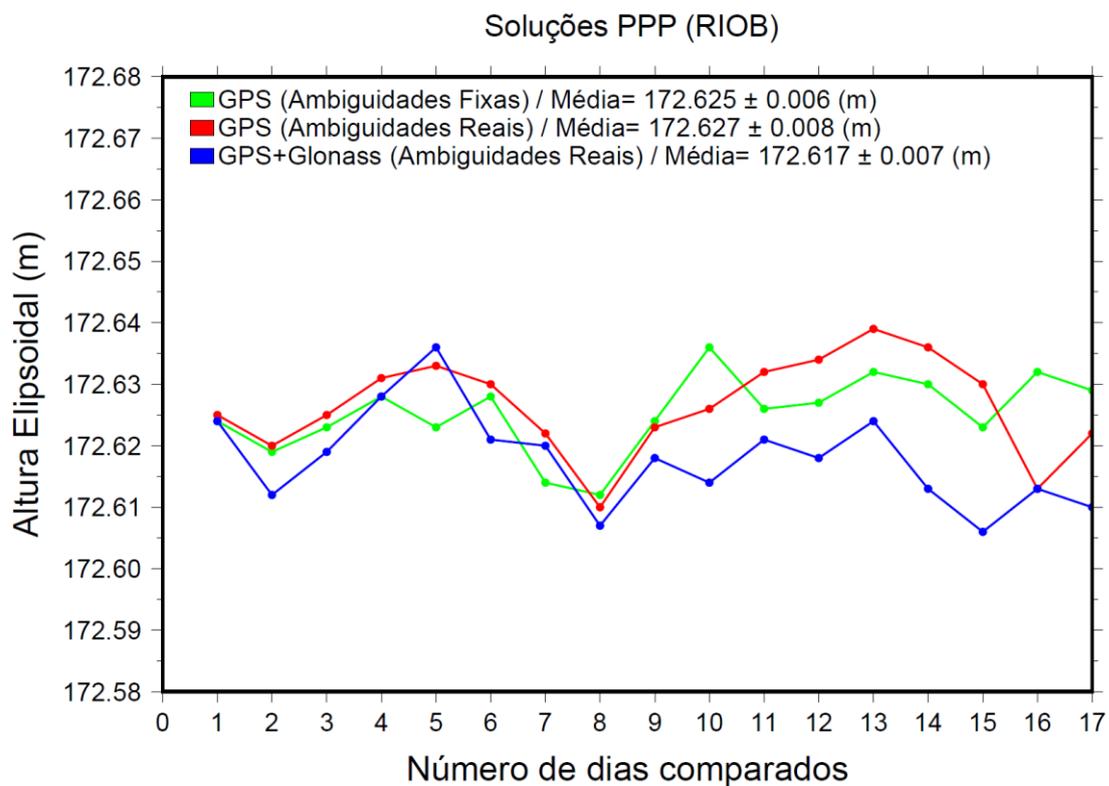


Figura 3.11 - Valores de altura elipsoidal para a estação NAUS utilizando diferentes estratégias de processamento PPP em diferentes datas.

As Figuras 3.8 a 3.10 mostram que, ao estabelecer valores inteiros para a ambigüidade, as soluções eliminam erros e artefatos das soluções de ambigüidades com valores não inteiros. O fato de possuir mais satélites e conseqüentemente melhor geometria com suporte da solução GPS+GLONASS pode garantir uma solução mais precisa, no entanto a exatidão dessa solução pode estar impactada por erros sistemáticos causados por erros de órbitas e relógios oriundos da adição de nova constelação no processamento.

3.2 Correção da carga hidrológica

Uma questão importante para os levantamentos geodésicos realizados na região Amazônica, é que nesta região a crosta terrestre sofre de consideráveis deslocamentos verticais. Esses deslocamentos ocorrem devido à grande movimentação de água em seu ciclo (hidrológico) na região, que causa a redistribuição de massa entre o continente e oceano, fazendo com que a crosta terrestre responda elasticamente a essa redistribuição de carga ou massa e se deforme. Essa deformação afeta mais as coordenadas verticais e, principalmente, o ponto de aplicação da carga e, em complementação, devido a resistência lateral da crosta esse efeito se propaga para regiões vizinhas.

Esses deslocamentos causados pela carga hidrológica são pouco monitorados na maioria das regiões do globo, tendo suas amplitudes e fases dependentes das forçantes meteorológicas. Devido à dificuldade de modelar esses efeitos, não existem modelos de correção recomendados pelas convenções do IERS. No entanto, muitos autores já tentaram estimar a amplitude e fase desses efeitos em várias partes do globo. Eles detectaram que, na maioria das regiões, a deformação da crosta é grande o suficiente para contribuir nos sinais GNSS, afetando assim a precisão das coordenadas obtidas (VANDAM *et al.*, 2001; WU *et al.*, 2003; BEVIS *et al.*, 2005).

Por esta razão quando são necessários levantamentos geodésicos com nível centimétrico de precisão, esses efeitos de carga hidrológica devem ser levados em conta. Essa correção é ainda mais necessária quando se realizam diversos levantamentos em períodos diferentes dada a variação sazonal do fenômeno. Com o objetivo de alcançar a melhor exatidão nos levantamentos GNSS realizados neste estudo, temos como meta remover o efeito de carga hidrológica das medições realizadas com receptores GNSS,

tanto para obtenção de altitude dos zeros de réguas, quanto para caracterização de perfis longitudinais.

A melhor forma de corrigir a variação de carga hidrológica seria o uso de longas e contínuas séries temporais de coordenadas obtidas por estações GNSS permanentes, que representariam diretamente os movimentos da crosta terrestre e as mesmas poderiam ser utilizadas para se corrigir medições realizadas nas proximidades da estação. Entretanto, conforme já mencionado, em regiões remotas como a bacia Amazônica, estas estações são limitadas em número e em qualidade da informação. Por essas razões é quase impossível usar estações GNSS para monitorar essa informação de forma contínua no tempo e no espaço, na maior parte das localidades dessa bacia.

Uma solução para este problema está no fato de que essas variações de massa de água causam alterações no campo gravitacional terrestre, sendo estas variações modeláveis pela missão espacial GRACE.

O estudo feito por DAVIS *et al.* (2004), usando os primeiros dois anos de dados da missão GRACE, encontrou excelente concordância entre dados de deformação da crosta derivados da missão GRACE e medições diretas de deformação da crosta obtidas da variação vertical de coordenadas de estações GNSS. Tal concordância foi obtida para sítios próximos à bacia Amazônica. Já o trabalho feito por TESMER *et al.* (2006) comparou dados de deformação crustal derivados do GRACE com dados de 115 estações permanentes GNSS em todo o globo, tendo como resultado que, em 80% das localidades, a utilização das séries do GRACE pode atenuar em parte os efeitos de carga hidrológica. Estudos como o de VAN DAM *et al.* (2007) e TREGONING *et al.* (2009) também obtiveram significantes correlações entre o GRACE e dados de estações GNSS com objetivo de modelar os efeitos de carga hidrológica.

Todavia, nenhum desses estudos usou estações na área da bacia Amazônica, que é a área do presente trabalho. As séries obtidas (Figura 3.9) demonstram que nesta região ocorre a maior variação de amplitude de deformação crustal causada por carga hidrológica em todo globo terrestre. No estudo de BEVIS *et al.* (2005) foram encontrados impressionantes 75mm de variação vertical da crosta pico a pico causada pelo ciclo hidrológico no centro da bacia Amazônica, no entanto a estação GNSS utilizada (MANA) possuía problemas de qualidade com muitos dados falhos e, além disso, os maiores eventos hidrológicos registrados em 100 anos de medição na bacia

Amazônica aconteceram depois do estudo de BEVIS *et al.* (2005), sendo estes a seca de 2010 e a cheia de 2012.

Alternativas aos estudos já apresentados e ao satélite GRACE estão relacionadas ao estudo de VAN DAM *et al.* (2001), que utilizou modelos hidrológicos para calcular a deformação da crosta. No entanto, estudos posteriores com o satélite GRACE mostraram que as variações da crosta terrestre obtidas pela modelagem hidrológica de VAN DAM *et al.* (2001) são bem menores dos que os encontrados nas nas soluções geradas pelo satélite, da ordem de 30mm pico a pico no ponto de maior amplitude da bacia Amazônica. Já recentemente, DILL e DOBSLAW (2013), usando o modelo de deformação crustal HYDL, modelo este que utiliza dados de entrada do modelo hidrológico LSDM (*land surface discharge model*) (DILL, 2008), encontraram resultados mais satisfatórios para a bacia Amazônica, como valores de 50-75 mm de deformação crustal nos pontos de maior amplitude dessa bacia. Esse modelo é capaz de fornecer dados diários de deformação da crosta terrestre com uma resolução de 0.5 graus, caracterizando, assim, uma alternativa interessante o uso desse modelo aos dados do GRACE, principalmente em zonas que carecem de uma melhor resolução espacial, já que a resolução espacial do GRACE é no mínimo de algumas centenas de quilômetros, dependendo do truncamento escolhido para cada centro de análise.

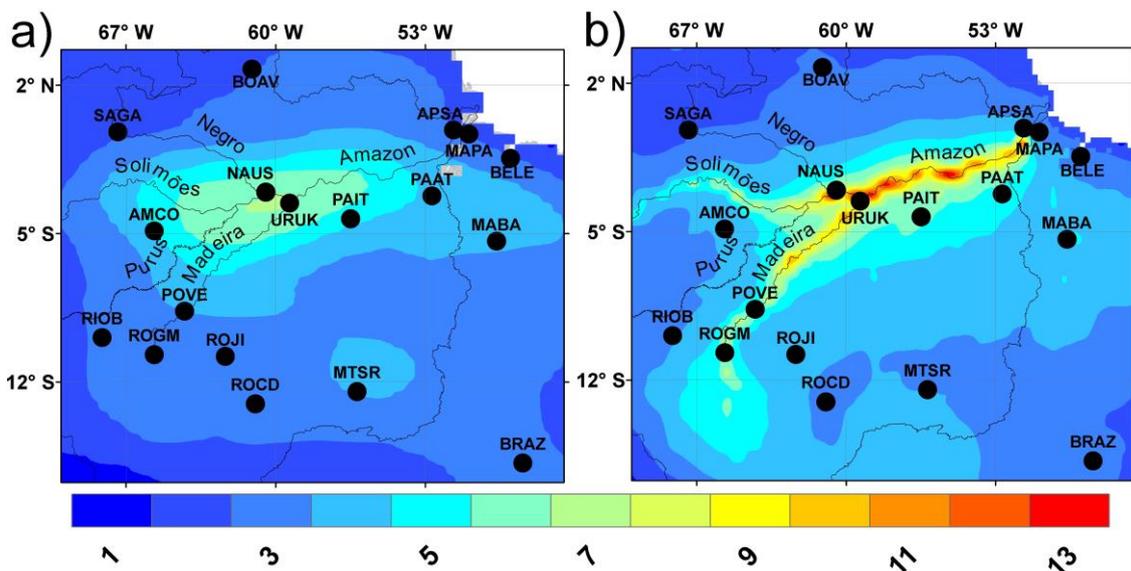


Figura 3.12 - Dados de deformação crustal derivados do GRACE (a) e do HYDL (b) em sua amplitude vertical máxima (cm). Baseado nas séries de 2005-2010 do GRACE (GRGS) e séries HYDL. Os pontos pretos indicam as estações GPS permanentes utilizadas neste estudo.

Com base em todas essas considerações e tendo em conta os estudos anteriormente apresentados, considera-se necessário e oportuno nesse trabalho avaliar e selecionar a melhor forma para corrigir a deformação crustal na bacia Amazônica. Com esse propósito serão avaliadas as séries do GRACE e do modelo HYDL, observando-se suas fases e amplitudes, e impactos de seu uso para correção da deformação crustal dos dados de estações permanentes GNSS apresentadas na Figura 3.9.

3.2.1 Dado GPS

Foi realizada análise em uma rede de 18 estações GPS situados na bacia do Amazonas e nas suas proximidades (figura 3.9), nessas estações, que são geridas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foram calculadas coordenadas diárias de cada estação usando o software GINS. Como foi antecipado que toda a região seria afetada pela significativa deformação crustal causada pelo ciclo hidrológico, a técnica de posicionamento por ponto preciso (PPP) por fornecer posições "absolutas", conforme já citado anteriormente foi a técnica escolhida. As coordenadas tiveram suas soluções atreladas ao ITRF2008 e todas as correções recomendadas pelo IERS abordadas no capítulo 2 foram consideradas, incluindo a correção de carga atmosférica. Conseqüentemente, as variações resultantes nas séries de coordenada vertical devem, principalmente, refletir a carga hidrológica, devido o sinal dessa carga ser dominante nos efeitos não-modelados da bacia amazônica. As soluções diárias das estações foram convertidas em médias mensais (usando o critério de rejeição de valores espúrios superiores a 3 sigma da média). A precisão esperada para processamento de coordenadas é a 5 mm 3D-RMS.

3.2.2 Dados GRACE

Foram utilizadas séries mensais de coeficientes do desenvolvimento em séries de funções harmônicas esféricas do potencial gravitacional de quatro centros de análise de dados do GRACE, sendo estas as séries do RL05 do Center for Space Research, University of Texas, US (CSR), RL05 do *GeoForschungsZentrum, Potsdam, Germany* (GFZ), RL05.1 do *Jet Propulsion Laboratory, US* (JPL) e as séries RL03-v1 do *Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale* (GRGS).

Para as séries do GFZ, CSR e JPL os coeficientes C (2,0) do campo gravitacional das soluções mensais foram substituídos por valores obtidos através de

técnicas de *satellite laser ranging* (SLR), conforme recomendado por CHENG e TAPLEY (2004). De forma a deixar os dados do GRACE com a mesma referência de dados GPS, também foram adicionados os termos de grau 1 às séries do geopotencial do GRACE discretas em coeficientes do desenvolvimento em séries de funções harmônicas esféricas ..

As soluções do CSR, JPL e GFZ, em seu estado bruto, normalmente precisam ser tratadas para eliminação de listras (*de-striping*) que são de forma e eliminar sinais anômalos na direção norte-sul e também necessitam de um filtro Gaussiano para suavizar ruídos nos sinais dos graus altos dos coeficientes do desenvolvimento em séries de funções harmônicas esféricas do potencial gravitacional. No entanto, para nossas soluções a opção de usar filtros acabou alterando de forma não linear a amplitude do sinal significativamente em alguns pontos observados. Sendo assim, preferimos apenas utilizar o procedimento de remoção de listras. Já as séries do GRGS são estabilizadas durante o seu processamento das mesmas não sendo requerida a aplicação de filtros ou processo de remoção de listras.

Após a execução dos procedimentos descritos, a partir dos dados das séries de do GRACE, é removido o valor médio dos coeficientes de forma a que os resultados sejam expressos em anomalias e com base nos estudos de WAHR *et al.* (1998) e DAVIS *et al.* (2004) a deformação crustal dos 18 pontos de estações permanentes pode ser obtida usando a seguinte fórmula da equação 3.1:

$$dr(\theta, \phi) = R \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l P_{l,m}(\cos \theta) \cdot (C_{lm} \cos(m\phi) + S_{lm} \sin(m\phi)) \frac{h'_l}{1 + k'_l} \quad (3.1)$$

Onde $dr(\theta, \phi)$ é o deslocamento da crosta na direção radial nas coordenadas θ e ϕ , h'_l e k'_l são os números de Love de para o grau l . $P_{l,m}$ são as funções normalizadas de Legendre para o grau l e ordem m . C_{lm} e S_{lm} são os coeficientes de massa de Stokes.

As séries do GRACE já possuem no seu pré-processamento a remoção dos efeitos atmosféricos sendo, portanto consistentes com os dados GPS e dados do modelo HYDL tendo suas variações de deformação crustal representando apenas os efeitos de carga hidrológica.

3.2.3 Dados HYDL

Para os dados do modelo de deformação crustal HYDL, o procedimento de obtenção dos dados é bem simplificado, tanto os grids globais diários de 0.5 x 0.5 graus e o script de extração dos dados pontuais a partir do grid podem ser baixados de <ftp://ig2-dmz.gfz-potsdam.de/LOADING/>. Sendo assim, para os 18 pontos de estações GNSS foram extraídas as séries deste modelo, mais informação sobre este modelo pode ser encontrada no arquivo README do FTP listado acima e em DILL e DOBSLAW (2013). Os dados HYDL foram convertidos para médias mensais de forma a se adequar com os dados GRACE e GPS.

3.2.4 Avaliação dos modelos de correção de carga hidrológica

Como as estações GNSS representam a medição direta de deformação da crosta nos locais das 18 estações GNSS, cada uma das séries de deformação vertical da crosta do GRACE (GRGS, CSR, JPL e GFZ) e do modelo HYDL foi comparada com a série de variação das coordenadas verticais das estações GNSS, de forma a estimar qual das séries representaria melhor o sinal encontrado nas estações GNSS. Nas 18 figuras a seguir de 3.8 até 3.24 são apresentados os gráficos os resultados dos processamentos das séries de deformação crustal causada por carga hidrológica do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS), HYDL e séries das estações GNSS.

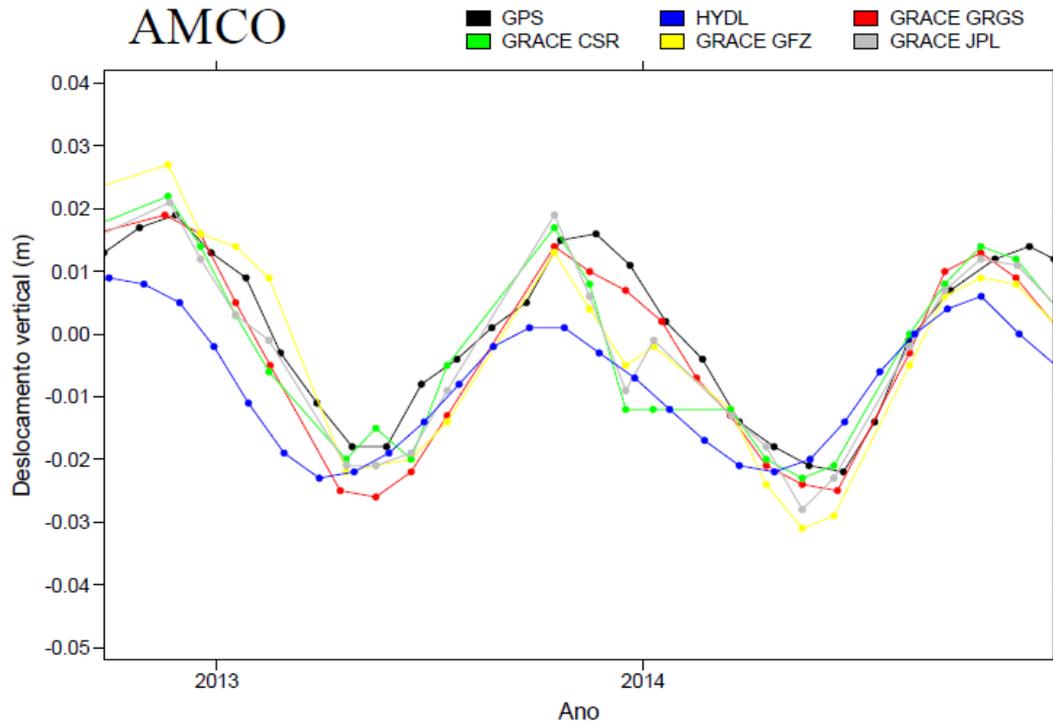


Figura 3.13 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de AMCO, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

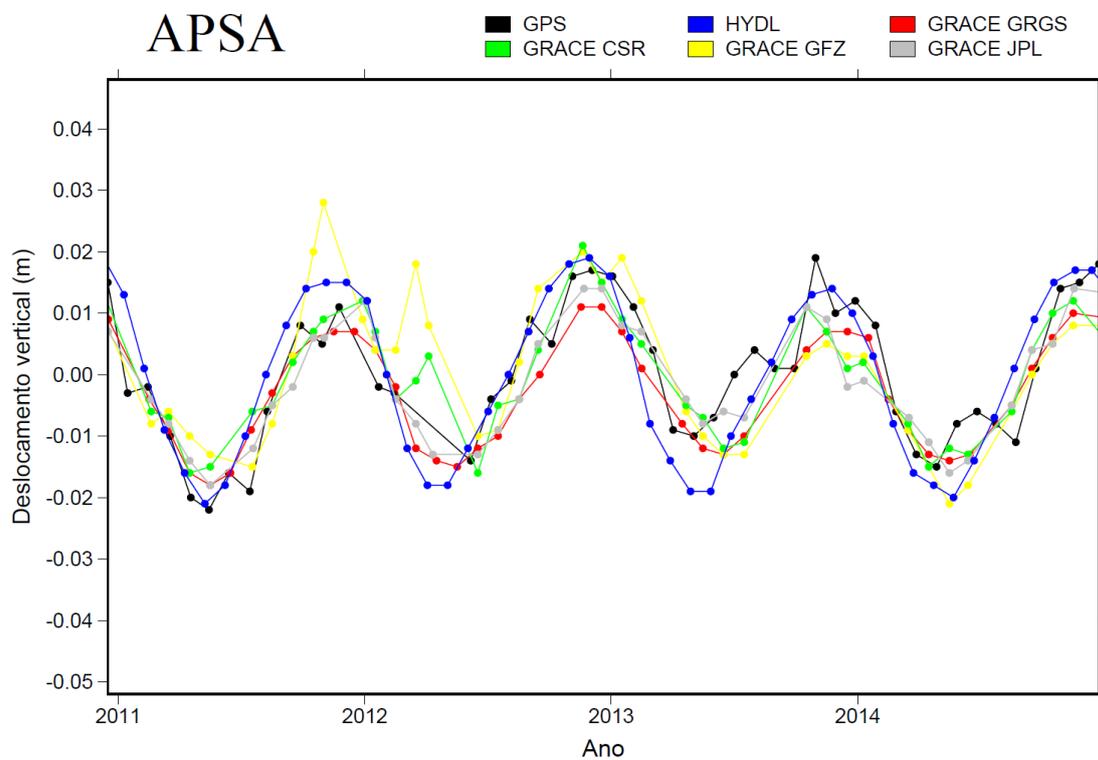


Figura 3.14 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de APSA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

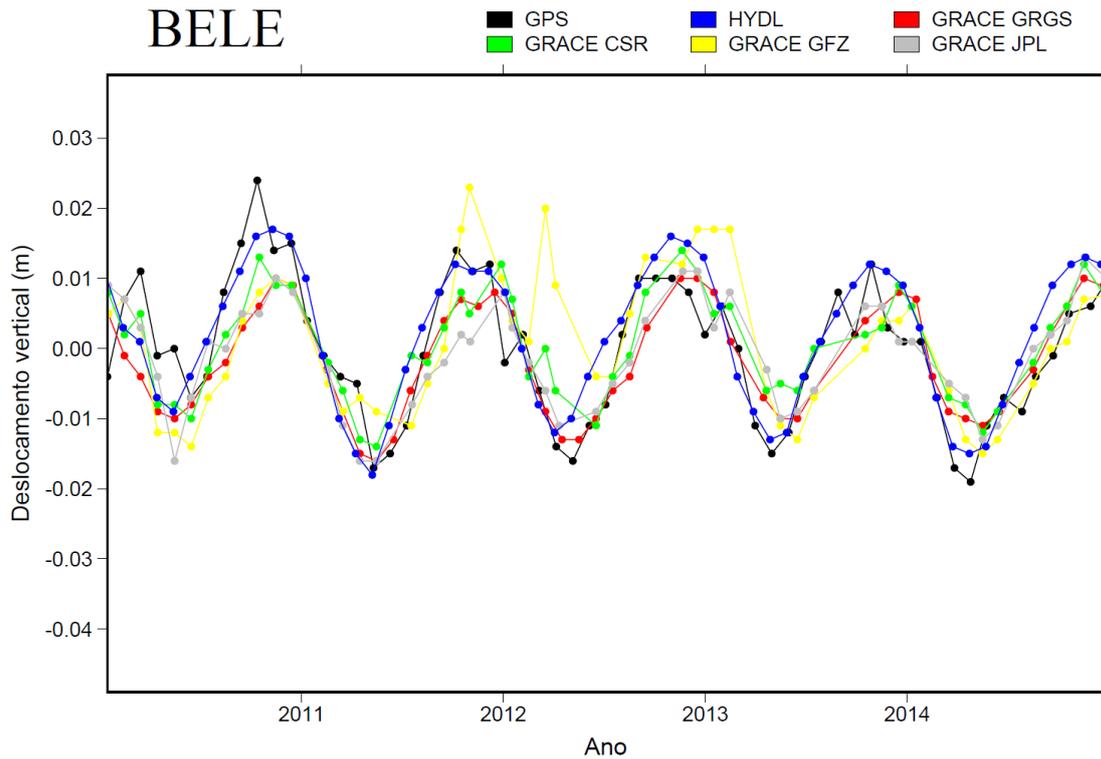


Figura 3.15 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de BELE, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

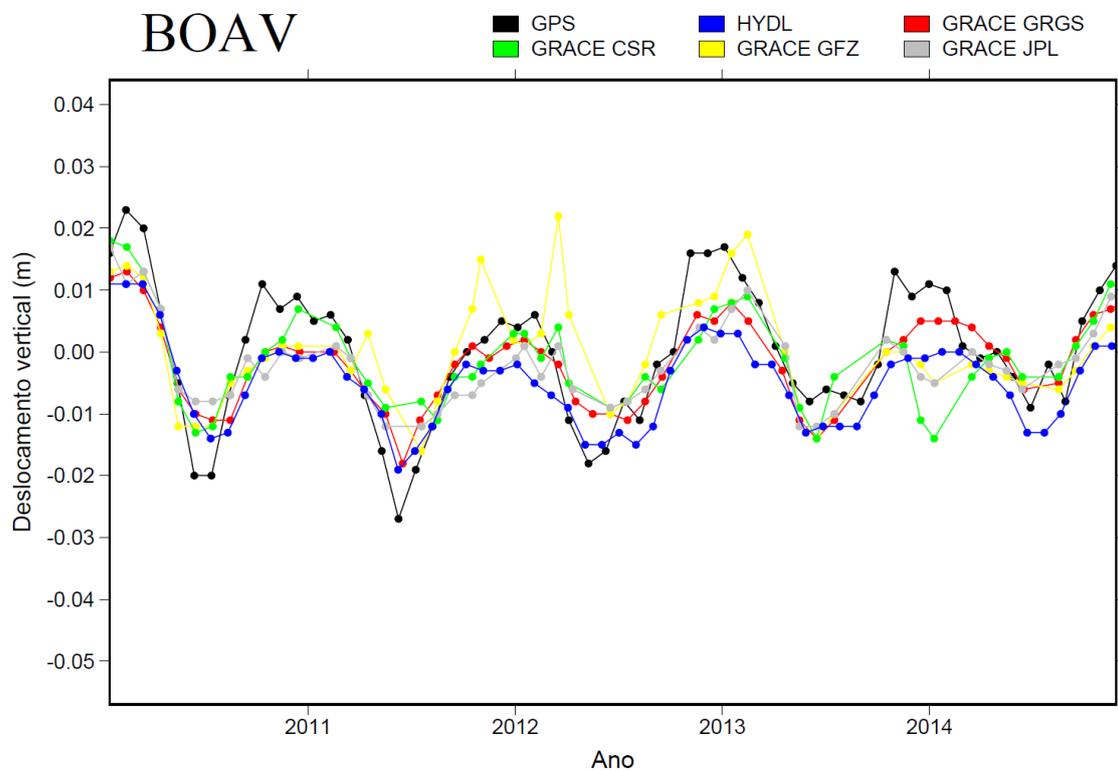


Figura 3.16 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de BOAV, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

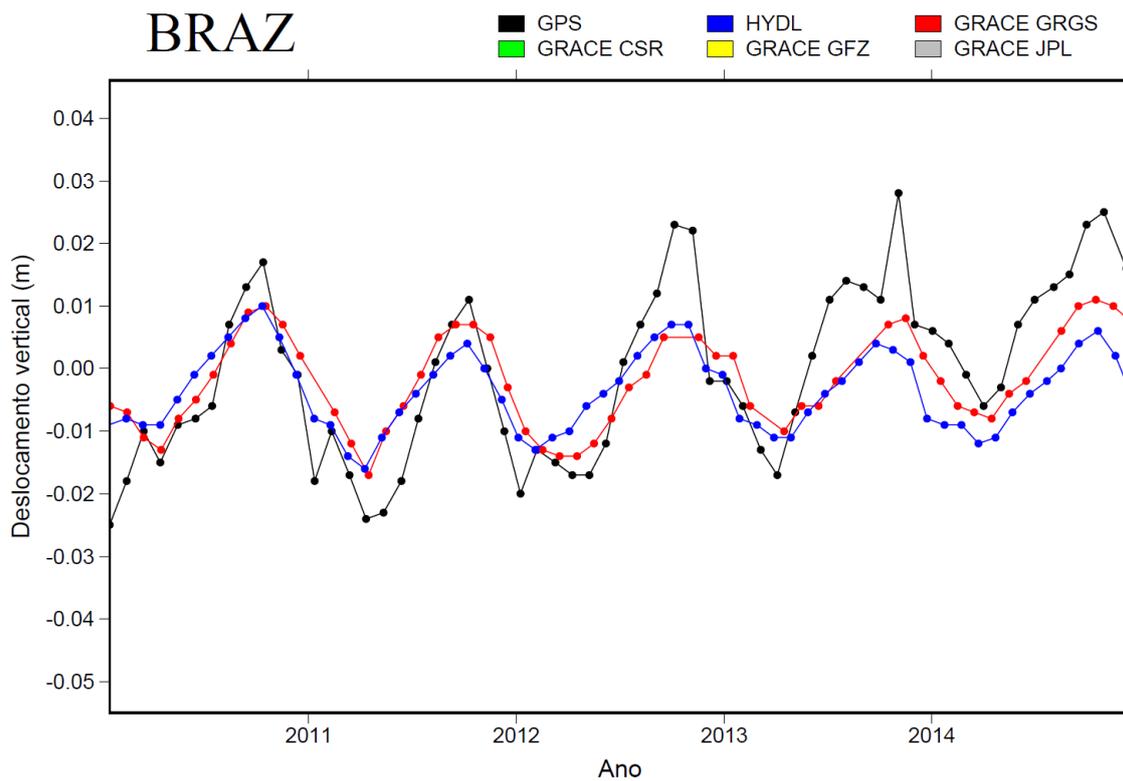


Figura 3.17 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de BRAZ, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

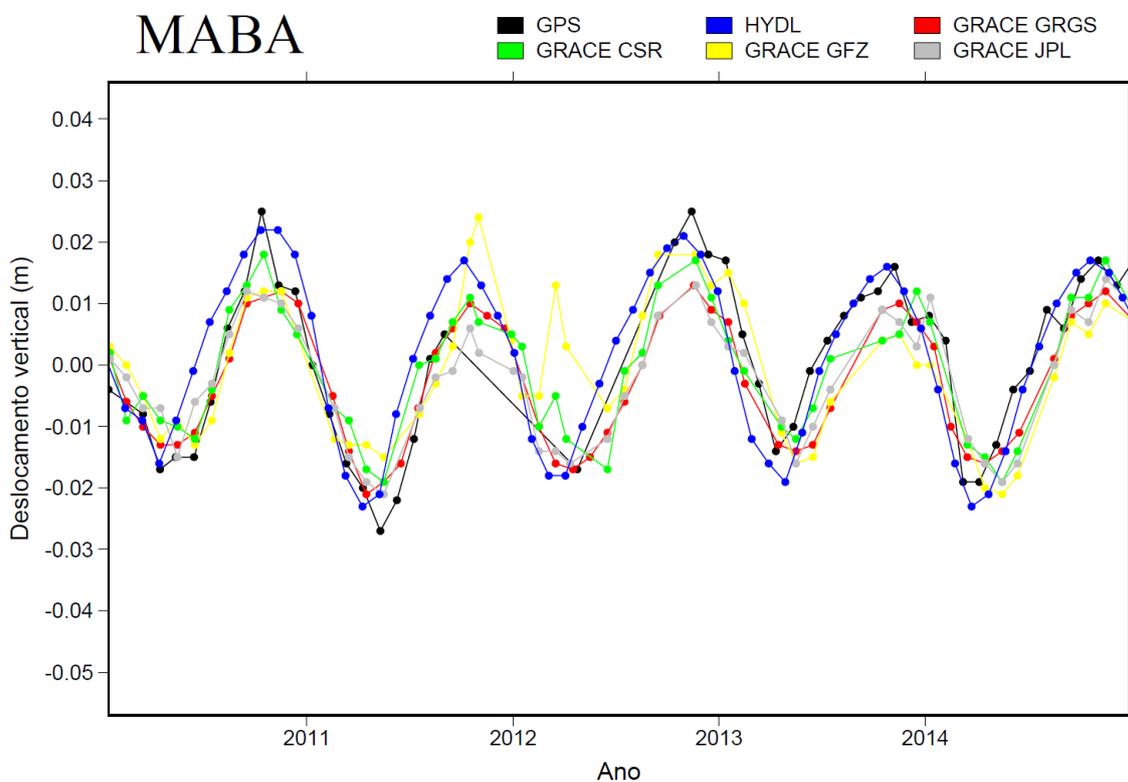


Figura 3.18 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de MABA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

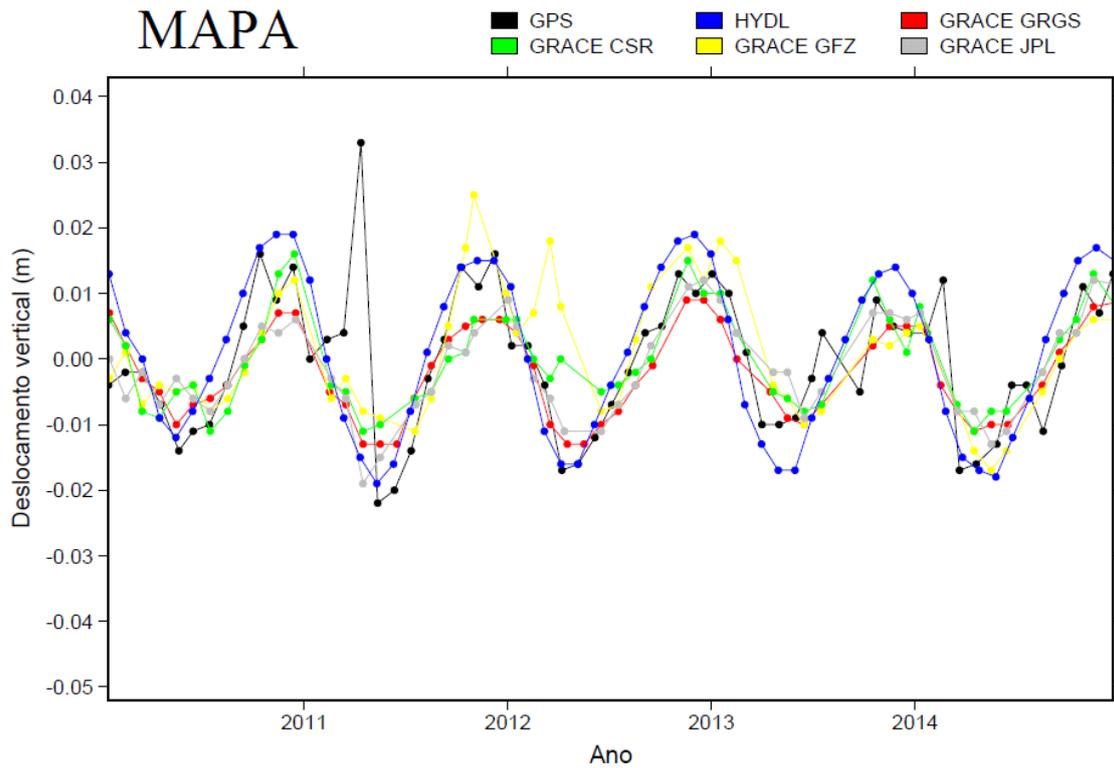


Figura 3.19 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de MAPA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

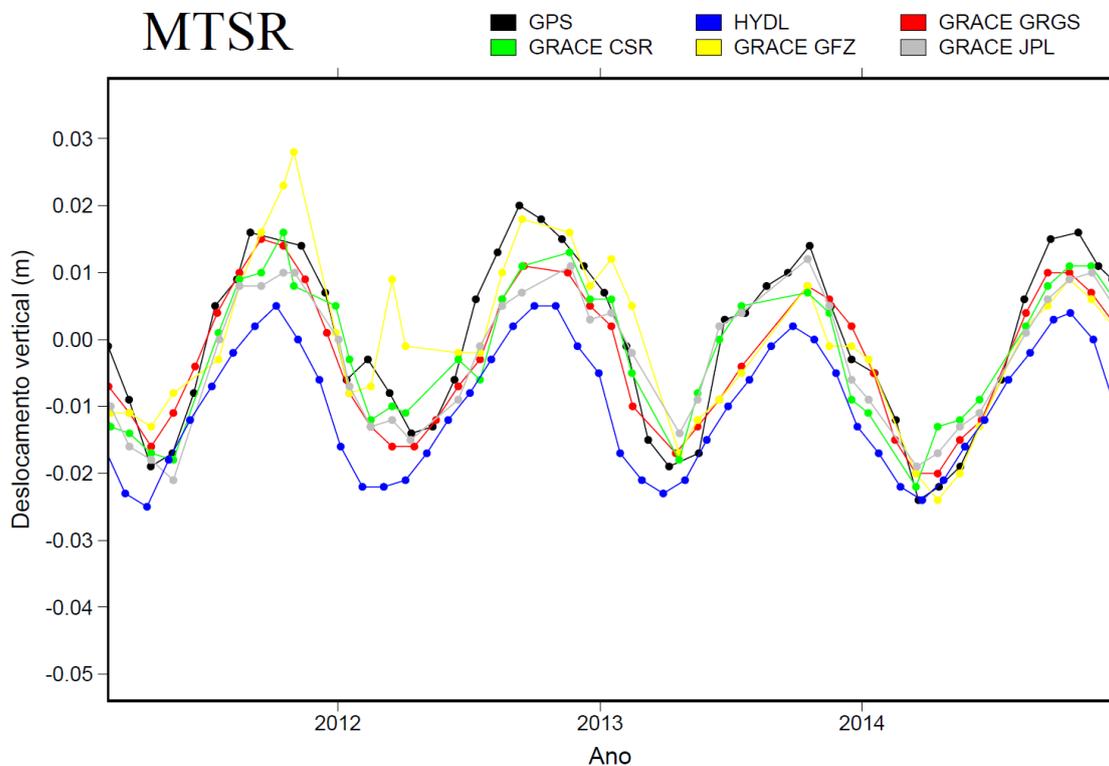


Figura 3.20 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de MTSR, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

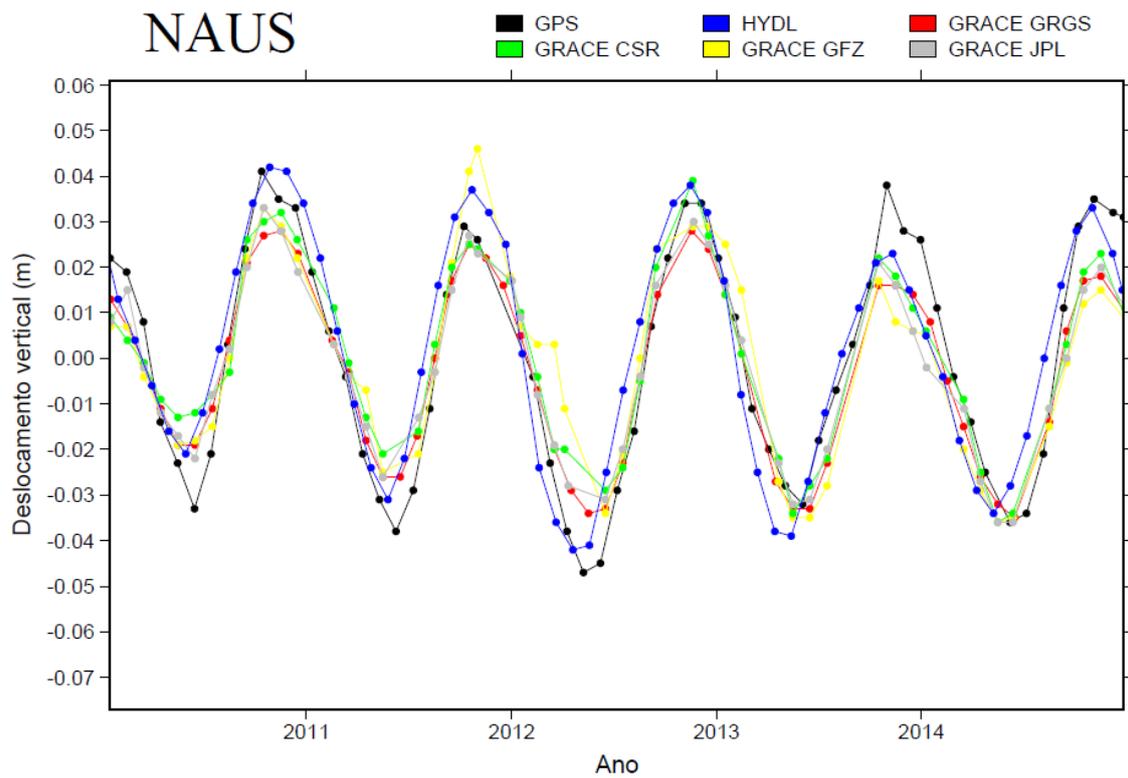


Figura 3.21 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de NAUS, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

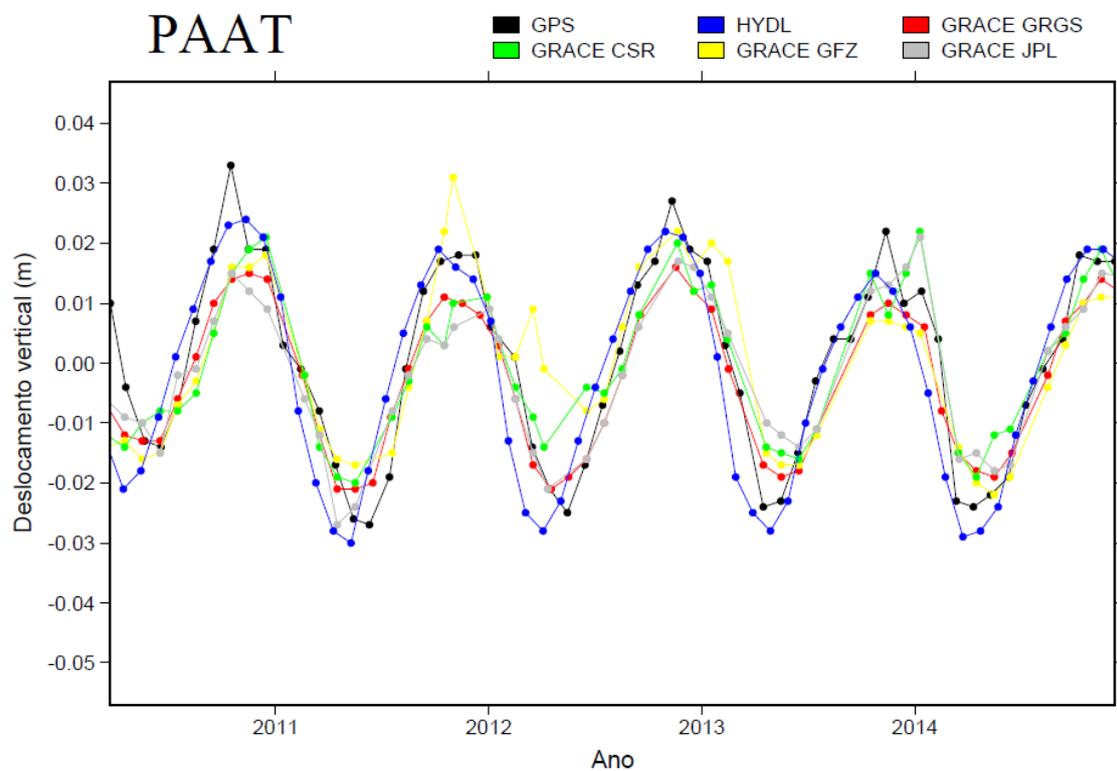


Figura 3.22 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de PAAT, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

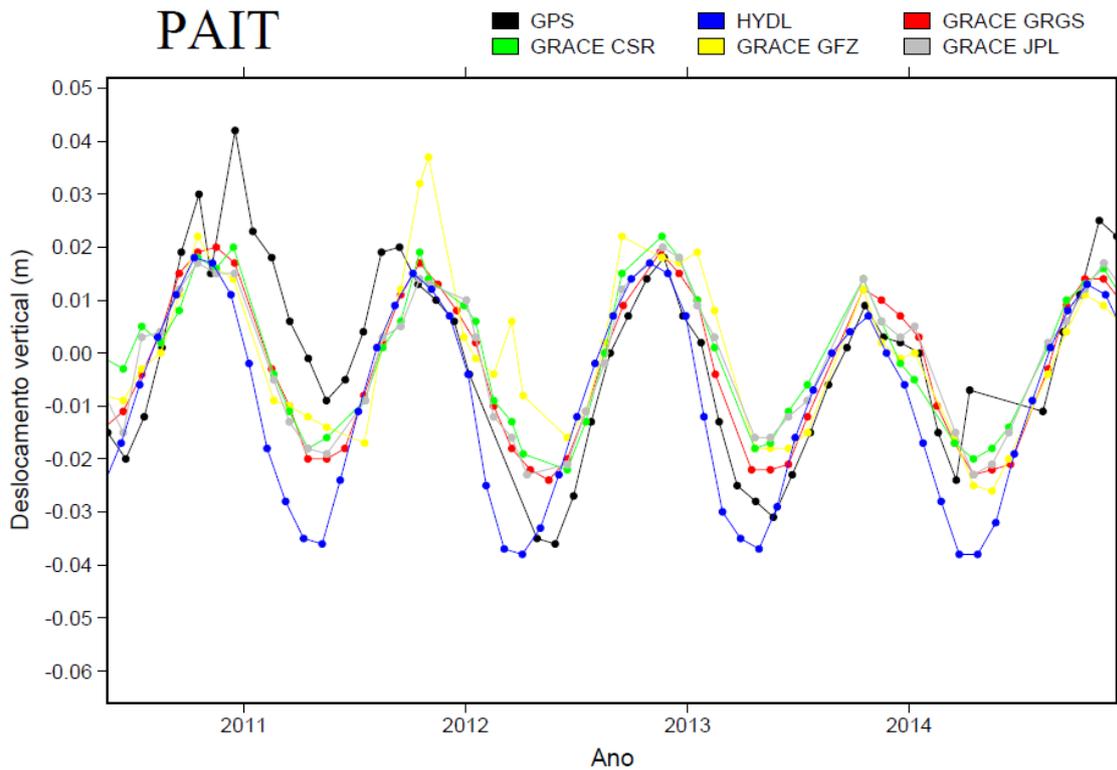


Figura 3.23 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de PAIT, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

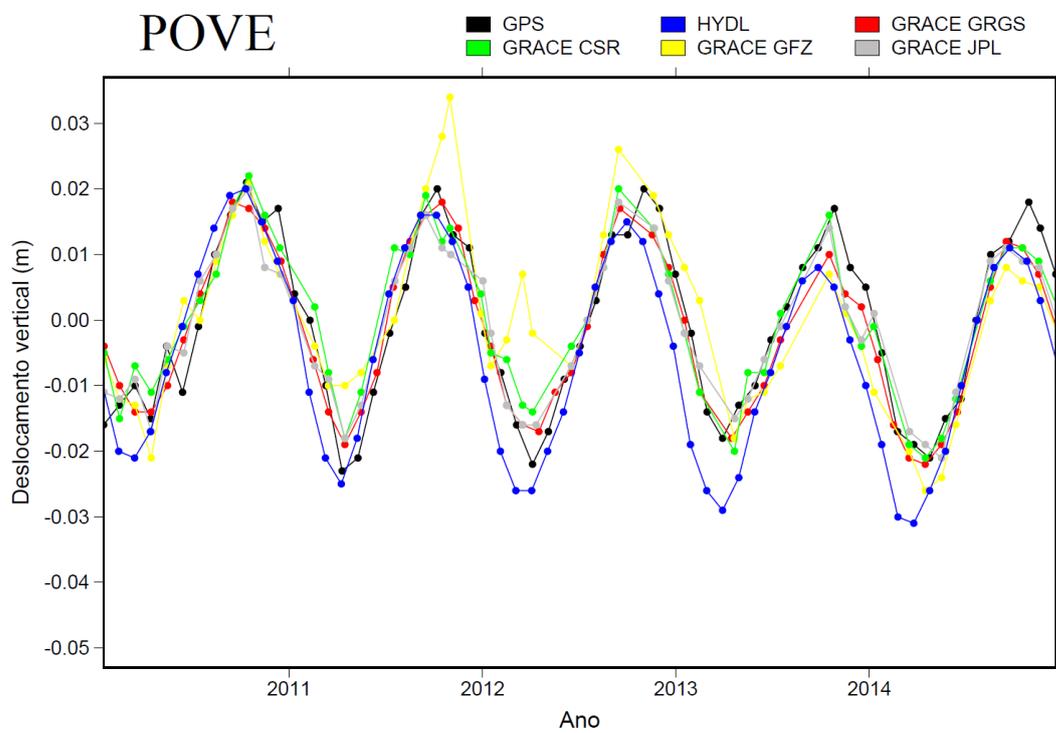


Figura 3.24 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de POVE, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

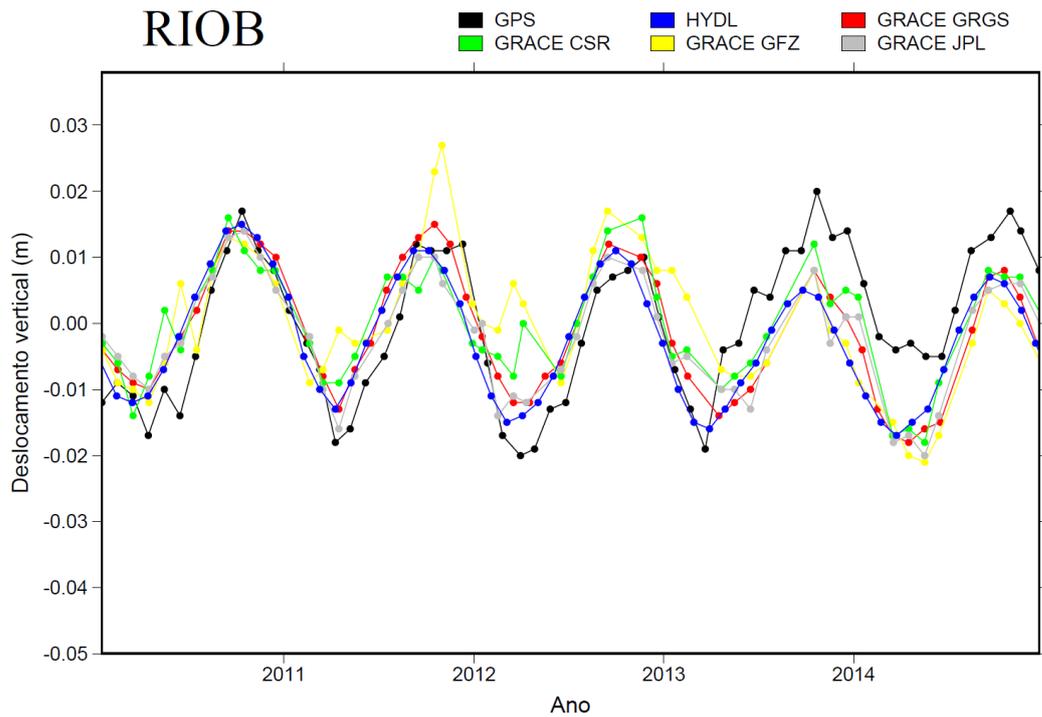


Figura 3.25 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de RIOB, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

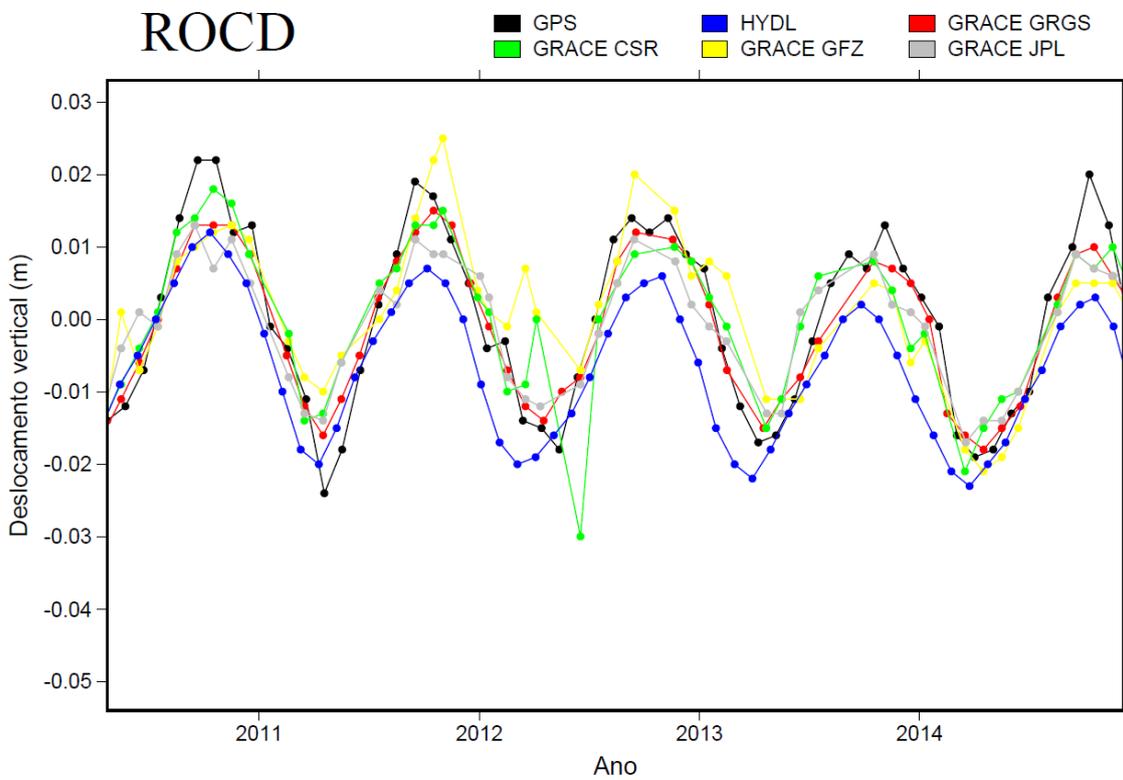


Figura 3.26 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de ROCD, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

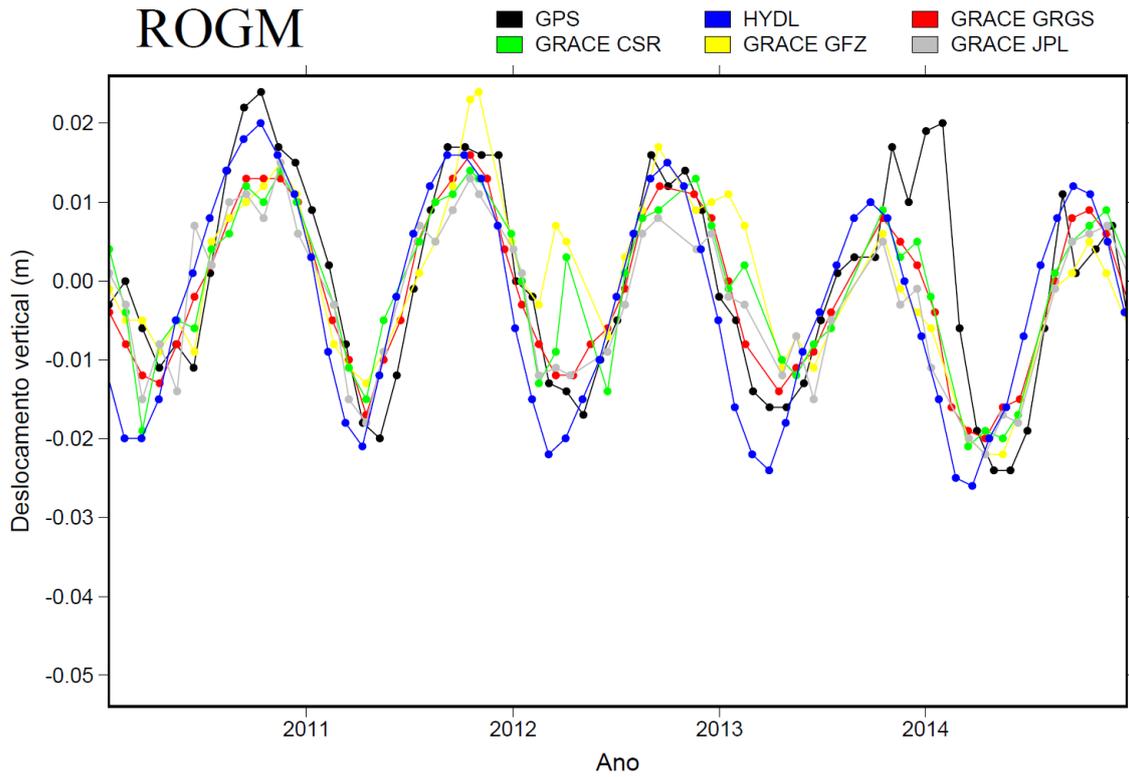


Figura 3.27 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de ROGM, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

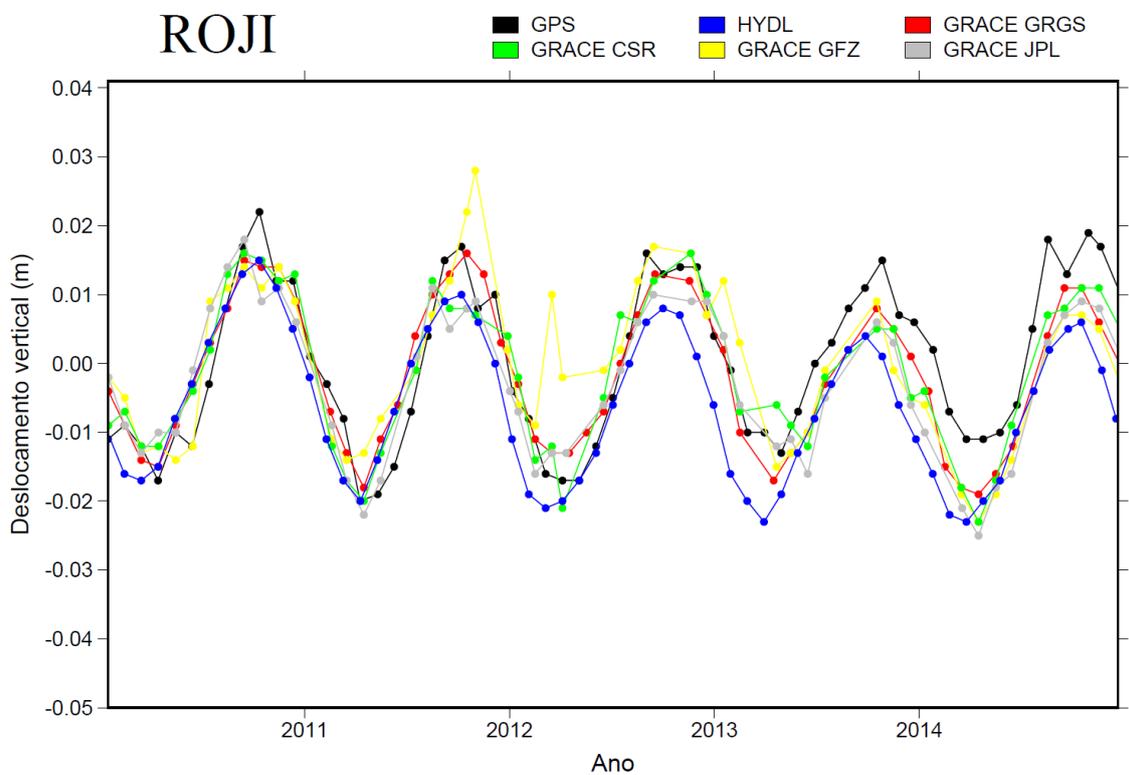


Figura 3.28 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de ROJI, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

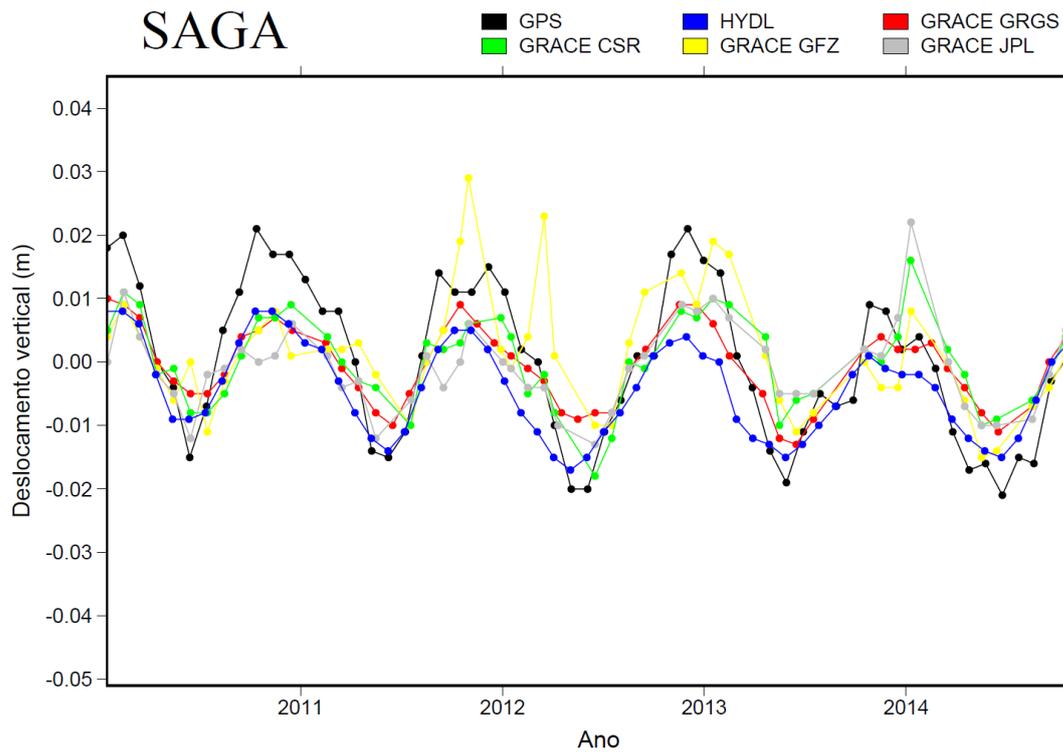


Figura 3.29 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de SAGA, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

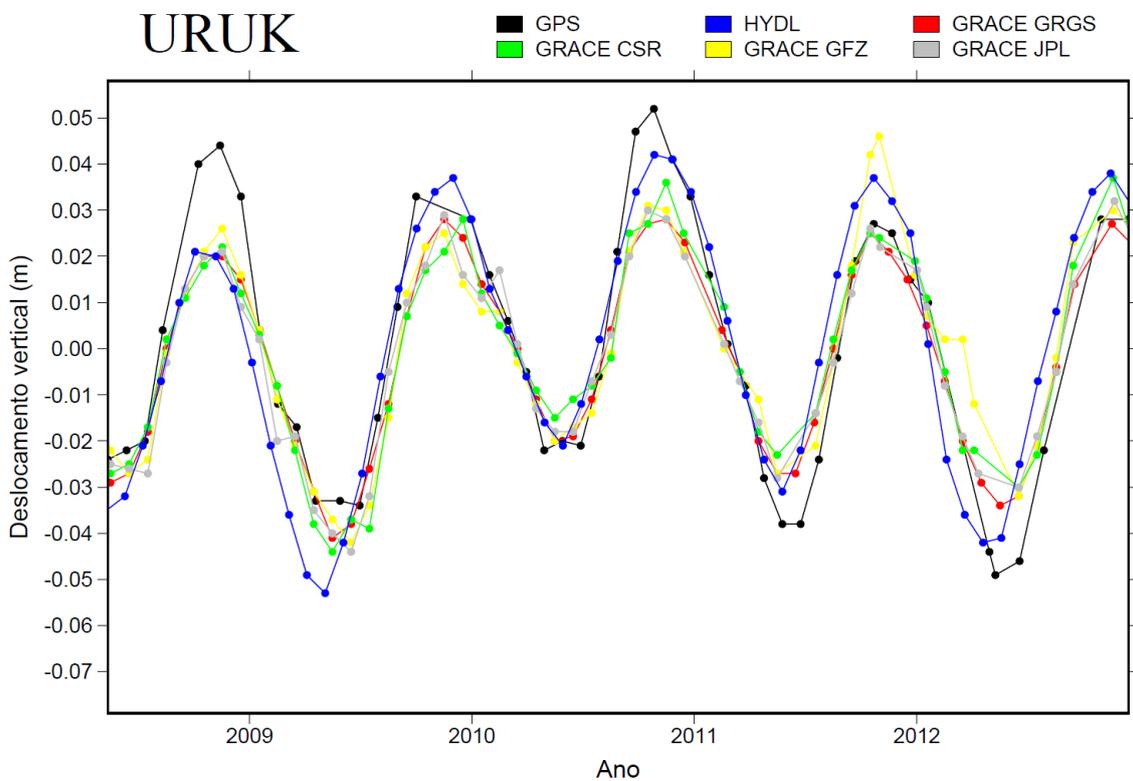


Figura 3.30 - Deformação crustal obtida pela estação GPS de URUK, derivada das séries do GRACE (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e modelo HYDL.

Para a comparação entre as séries em cada estação foram escolhidas três análises estatísticas:

-regressão linear entre a variação vertical das coordenadas GPS e as séries de deformação vertical da crosta (GRACE e HYDL). Na regressão foram analisadas a correlação entre os dados e também o fator de escala dado pelo coeficiente angular da reta da regressão.

-cálculo da redução do desvio padrão (DESVPAD) do sinal das séries GNSS após os mesmos serem corrigidos pelas séries de deformação vertical da crosta (GRACE e HYDL). Os valores dessa redução são obtidos pela fórmula

$$DESVPAD_{red} = \frac{DESVPAD_{GNSS} - DESVPAD_{GNSS-(GRACE \text{ or } HYDL)}}{DESVPAD_{GNSS}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Na qual o $DESVPAD_{red}$ é a porcentagem da redução do desvio padrão nos sinais nas séries GPS a partir da correção de deformação crustal baseada nas séries do GRACE ou HYDL. $DESVPAD_{gnss}$ é o desvio padrão das séries de GPS sem correções e $DESVPAD_{gnss-(Grace-hydl)}$ é o desvio padrão das séries GPS corrigidas pelo GRACE ou HYDL.

Sendo os resultados então expressos em porcentagem de redução dos sinais desta série, com 100% é realizado a correção total das variações verticais obtidas nas estações GNSS. Na 3.3 são apresentados os valores da análise estatística das séries do GRACE e do HYDL na sua comparação e correção das séries de estações GPS.

Tabela 3.2 - Resultados das comparações GNSS com as séries do GRACE (GRGS,CSR,JPL e GFZ) e do HYDL.

SÉRIES	FATOR DE ESCALA COM GPS			CORRELAÇÃO COM GPS			REDUÇÃO DE DEFORMAÇÃO NO GPS		
	MIN	MAX	MÉDIA	MIN	MAX	MÉDIA	MIN	MAX	MÉDIA
CSR	0.38	0.96	0.67	0.56	0.93	0.85	18%	65%	47%
JPL	0.36	0.99	0.63	0.59	0.96	0.86	18%	65%	48%
GFZ	0.26	1.13	0.67	0.45	0.93	0.76	1%	60%	34%
GRGS	0.43	1.06	0.7	0.71	0.99	0.9	29%	72%	55%
HYDL	0.45	0.97	0.66	0.66	0.93	0.84	25%	64%	44%

A partir das análises da Tabela 3.3, que indicam resultados melhores para as séries do GRACE/GRGS, são realizadas e apresentadas as comparações e análises apenas para as séries do GRGS e do modelo HYDL, com objetivo de contrapor essas duas metodologias.

Na Figura 3.26, são apresentadas as variações pontuais na comparação da correlação com estações GPS com as séries do GRACE (a) e HYDL (b) e também o fator de correção das séries do GRACE (c) e HYDL (d) nas coordenadas verticais das estações GPS.

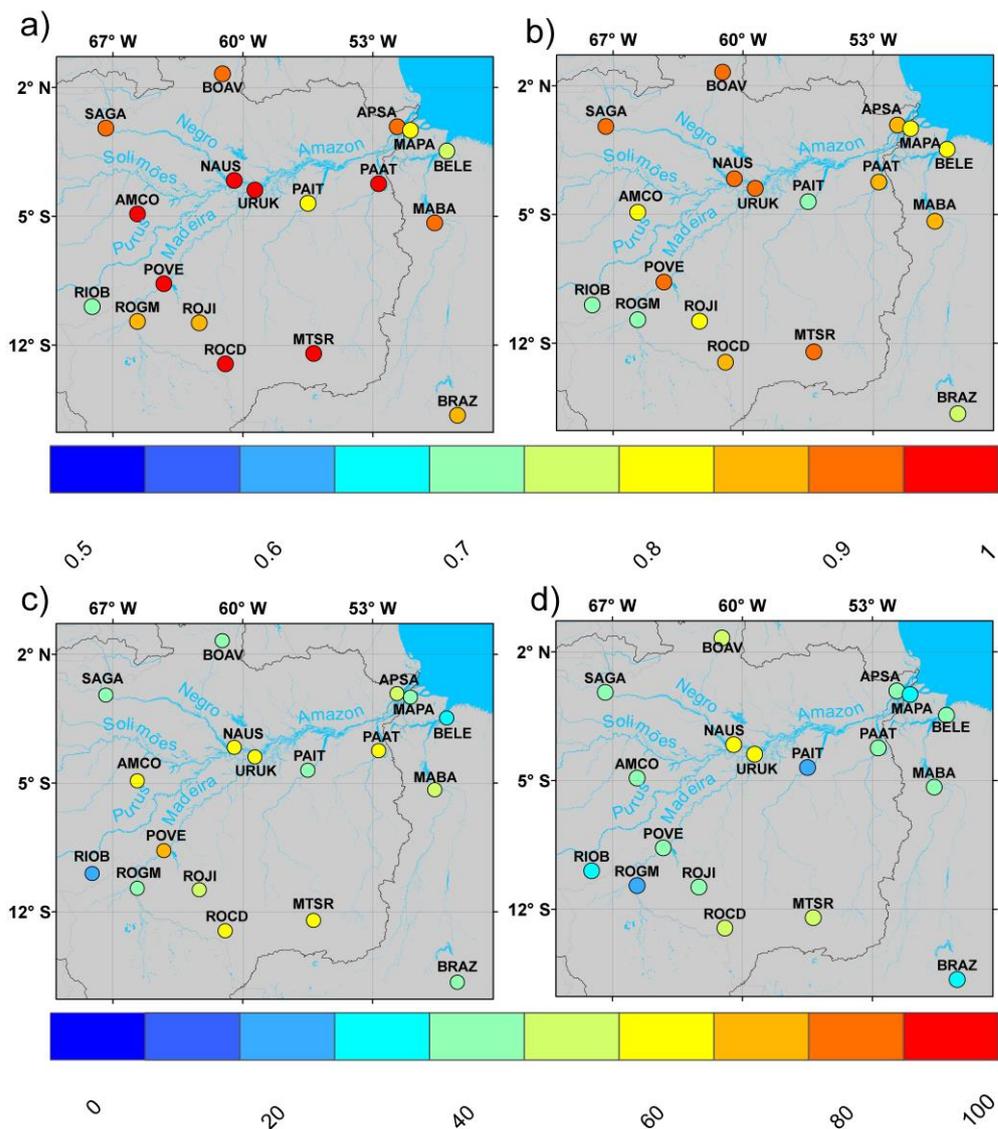


Figura 3.31 – Correlação de dados entre GPS e GRACE(a) , GPS e HYDL(b) e porcentagem de correção dos efeitos de deformação crustal em estações GPS por séries do GRACE (c) e HYDL(d).

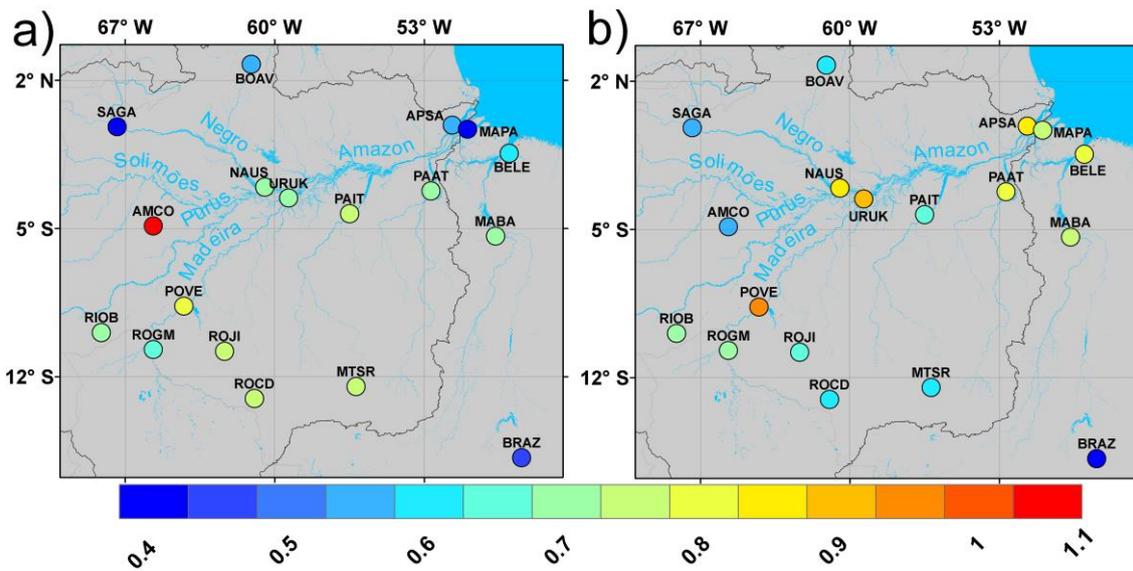


Figura 3.32 – Fator de escala entre as séries de estações GPS e séries do GRACE (a) e HYDL (b)

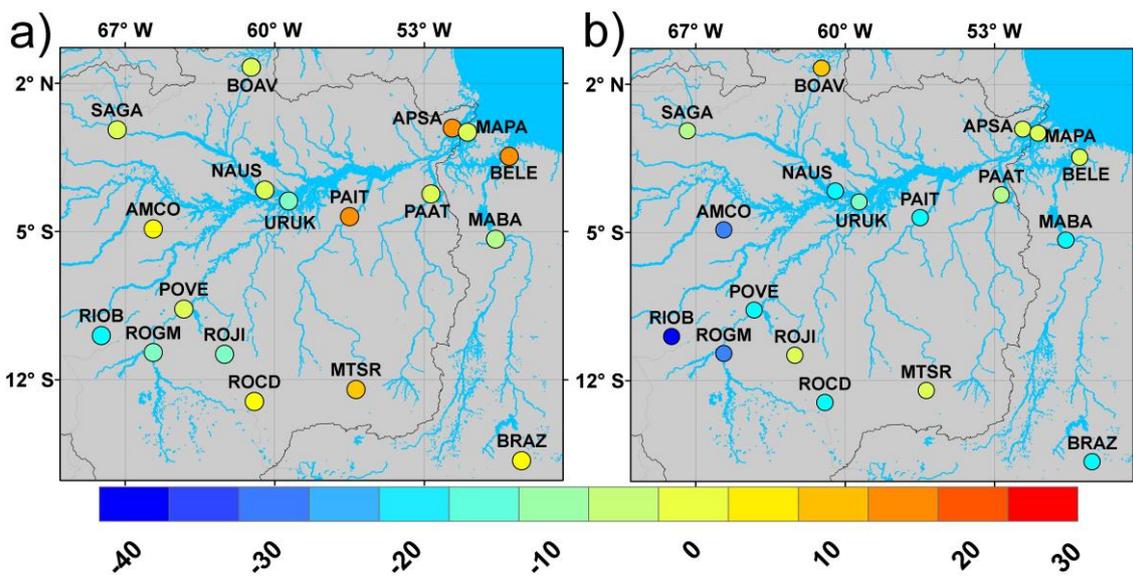


Figura 3.33 – Diferença de fase em dias das séries de estações GPS e séries do GRACE (a) e HYDL (b)

Em todas as análises as séries do GRACE e HYDL foram capazes de reduzir as variações encontradas nos sinais GNSS, no entanto nenhuma delas foi capaz de reduzir totalmente os sinais encontrados em nenhum dos 18 pontos observados, os fatos que explicam essa condição são:

-primeiro os erros devidos à imprecisão da medição de deformação da crosta por todas as técnicas utilizadas, tanto GNSS quanto GRACE e HYDL.

-comparação de medições pontuais GNSS com produtos com limitadas resoluções espaciais.

O fato de as medições do GRACE e HYDL representarem os valores de deformação da crosta em grandes áreas resulta em uma suavização dos valores acabam sendo suavizados em relação a medições pontuais GNSS. A falta de resolução do GRACE~300km faz suas soluções de deformação da crosta serem ainda mais suavizados que as medições do HYDL, sendo isso claramente observado na diferença de valores do fator de escala entre os produtos. Os dados do HYDL alcançam melhor amplitude do sinal em relação aos dados GNSS, no entanto a melhor correlação das séries do GRACE com as séries de coordenadas verticais GNSS indica que os dados do GRACE estão mais próximos das mesmas fases das variações GNSS.

Em termos gerais, as séries do GRACE para a região Amazônica apresentam ainda a melhor correção para os dados GNSS, tendo em destaque as séries do GRGS que na análise geral das 18 estações GNSS são as séries que apresentam as melhores correções para as estações GNSS. É interessante que as séries do HYDL as mesmas mostraram resultados melhores para três pontos observados, justamente para pontos mais isolados da bacia Amazônica que podem sofrer efeitos de hidrologia local que não são bem observados pelos dados do GRACE.

A baixa correção encontrada para algumas estações como MAPA , RIOB e BELE, que apresentam correções menores que 40 %, demonstram que algumas estações podem possuir erros significativos em suas séries causados por problemas no processamento dos sinais GNSS recebidos, multicaminho e problemas de estabilidade da fundação da antena do receptor, que pode não estar se movimentando em conjunto com a crosta terrestre. Esse fato pode ser considerado na estação MAPA com apenas 25% de correções a partir das medições das séries do GRACE GRGS está afastada apenas por 15 quilômetros de distância da estação de APSA que obteve a correção de 54% dos sinais GNSS a partir das séries GRGS do GRACE.

Além do sinal sazonal forte de deformação crustal, observou-se uma tendência linear desse fenômeno na parte inferior da bacia amazônica de -1 mm / ano (Figura

3.29). Este resultado pode ser ligado a um resultado recente de REAGER *et al.* (2016). No qual o mesmo evidenciou um aumento de armazenamento de água na bacia Amazônica, a partir do estudo também baseado nos dados do GRACE. Este aumento correspondente de armazenamento de água representa uma tendência em valores de deformação crustal que são consistentes resultados obtidos nessa tese.

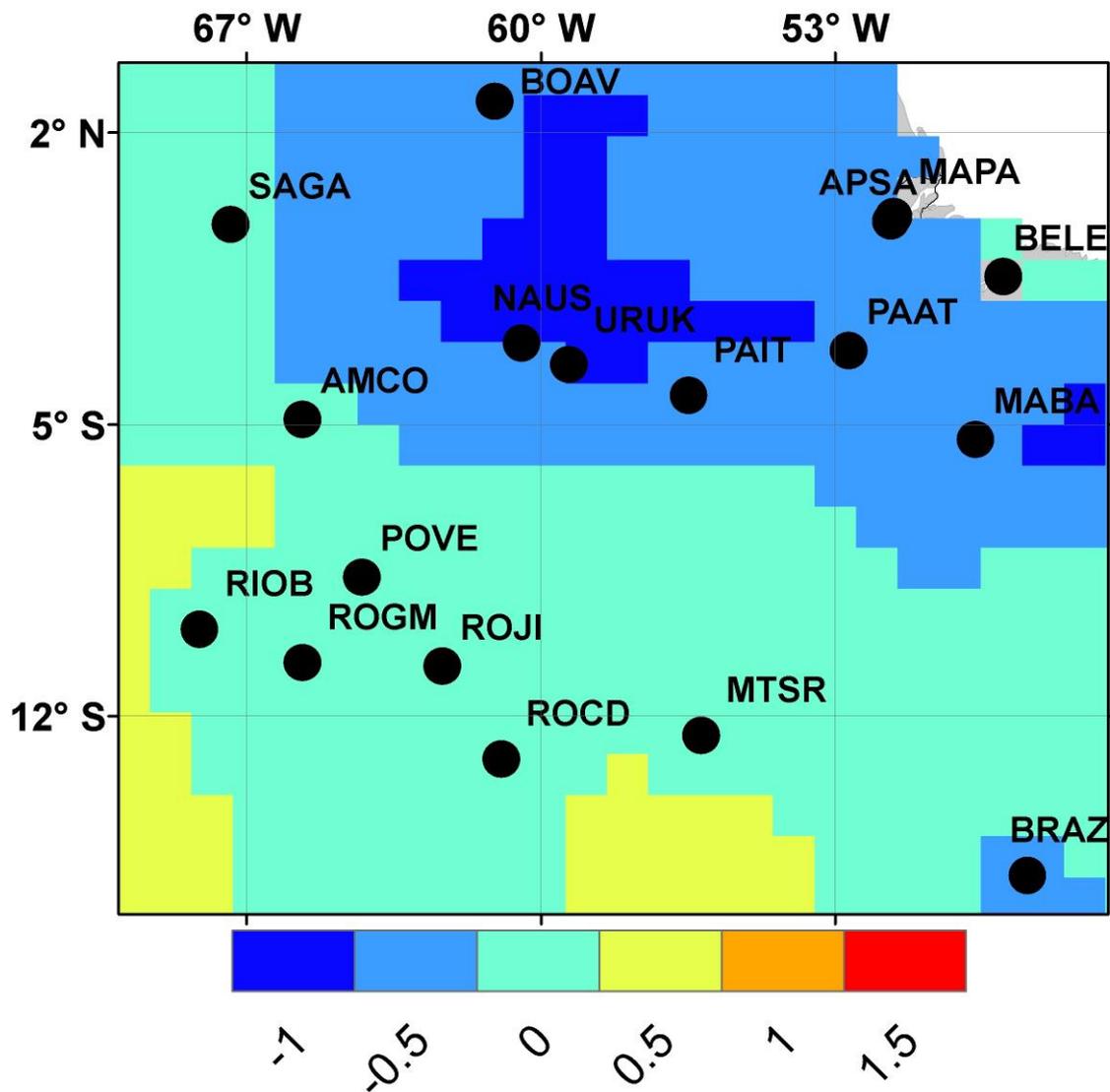


Figura 3.34 – Tendência em milímetros/ano da variação vertical da crosta devido a carga hidrológica avaliadas pelas séries do GRACE (GRGS) 2003-2014.

CAPÍTULO 4 – BACIA AMAZÔNICA

A bacia hidrográfica do rio Amazonas tem importância estratégica para a maioria dos países que a compõem. De sua área total de 5.930.778km², pode-se subdividi-la da seguinte forma: 62,5% estão em território brasileiro; 5,8% na Colômbia relativos às sub-bacias dos rios Caquetá, Apaporis, Purê, Putumayo, Vaupés e Guainía; 16,1% no Peru relativos à sub-bacias dos rios Putumayo, Marañon e Amazonas; 12,1% na Bolívia relativos às sub-bacias dos rios Abunã, Beni e Mamoré; 2,2% no Equador relativos à região das cabeceiras dos rios Marañon, Tigre e Amazonas; 0,8% na Venezuela relativos à sub-bacia do rio Guainia; e 0,2% na Guiana relativos à sub-bacia do rio Tacutu. Os cálculos de áreas e a porcentagem de território de cada país na bacia foram realizados usando as bacias hidrográficas delimitadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e podem ser adquiridas através do seguinte sítio de internet <http://metadados.ana.gov.br>. Na Figura 4.1, podem ser visualizados a localização geográfica da bacia Amazônica, suas principais sub-bacias e países que a constituem.



Figura 4.1 – Bacia Amazônica, principais sub-bacias e países componentes.

O fato de a porção brasileira da bacia Amazônica estar situada à jusante das porções estrangeiras faz com que seja essencial para o Brasil conhecer a hidrologia nessas sub-bacias para a previsão de eventos hidrológicos críticos, o que hoje não é plenamente possível, pois não se tem acesso nem mesmo aos dados das estações existentes nos países vizinhos. Por outro lado, para esses países situados mais a montante na bacia, o conhecimento da hidrologia em território brasileiro é importante pela responsabilidade por preservar os recursos hídricos para as populações situadas a jusante e pela navegação fluvial.

No entanto, conforme destacado previamente por GETIRANA (2009), SILVA (2010) e por XAVIER (2012), evidenciado e caracterizado no capítulo introdutório desta tese, a bacia Amazônica não possui uma rede de monitoramento densa conforme preconizam diretrizes do Organização Meteorológica Mundial (OMM) (WMO – *World Meteorological Organization*).

Quanto ao número mínimo de estações em uma rede de monitoramento hidrometeorológica, a WMO, embasada em uma metodologia simplificada de avaliação otimizada de redes, sobretudo respeitando condições fisiográficas e climáticas da bacia, publicado, inicialmente, em 1965, com continuadas e relativamente recentes atualizações.

Estudos recentes desenvolvidos por SPITZ (2014), SOUZA (2015) e MOLINARI (2015) exploram a modelagem hidrológica e os dados de sensoriamento remoto no contexto de emprego de geotecnologias para tecer considerações mais específicas e atualizadas para procedimentos que seriam recomendáveis a serem adotados no dimensionamento de redes de monitoramento hidrológico. SPITZ (2014) avalia a rede de monitoramento hidrometeorológico na bacia do Dois Rios, situada na região montanhosa do estado do Rio de Janeiro, a partir de dados TRMM e análise de componentes principais e técnicas geoestatísticas. Complementarmente, MOLINARI (2015) emprega modelo hidrológico semidistribuído HSPF (*Hydrological Simulation Program – FORTRAN*) (EPA, 2000) e bases de dados de quantidade e de qualidade de água e de imagens de satélite para a bacia do rio Piabanha, afluente do rio Paraíba do Sul, também situada na região montanhosa do estado do Rio de Janeiro, contígua à bacia do Dois Rios, para tecer considerações para a rede de monitoramento presente na bacia. SILVA (2015) emprega o modelo hidrológico semidistribuído SWAT (*Soil and*

Water Assessment Tool) (ARNOLD e SRINIVASAN, 1995) conjuntamente com imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento para identificar, entre outros pontos da pesquisa, uma avaliação da rede de monitoramento na bacia do rio Machadinho, em Rondônia, situada na porção ocidental da Amazônia.

Por exemplo, segundo SPITZ (2014), a partir de WMO (2008), pode-se, por meio da Tabela 4.1, examinar a proposição de quantidade mínima de estações recomendadas para uma rede de estações pluviométricas de acordo com as características da bacia e com o tipo de estação, convencional ou automática. Nota-se que a área de cobertura para estações automáticas é superior ao estabelecido para estações com operação manual, distinção que procura levar em conta a defasagem dos tipos de medição ao longo do tempo.

Tabela 4.1 – Densidade mínima de estações de monitoramento de precipitação recomendada pelo WMO (área em km² por estação) de acordo com o tipo. Fonte: SPITZ (2014) (adaptado de WMO, 2008)

Unidade Fisiográfica	Convencional	Automática
Costas	900	9.000
Montanhas	250	2.500
Planícies de Interiores	575	5.750
Acidentado Ondulante /	575	5.750
Pequenas Ilhas	25	250
Áreas Urbanas	-	10-20
Regiões Polares / Áridas	10.000	100.000

Segundo GONTIJO (2007) e consoante consulta recente ao banco de dados da Agência Nacional de Águas, a rede hidrometeorológica nacional é composta por 2690 postos pluviométricos, 432 estações automáticas e 1.817 estações pluviométricas, com 374 automáticas, totalizando 4.633 estações hidrometeorológicas, onde se monitoram o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas. No caso

das estações pluviométricas da bacia Amazônica, constatam-se 465 estações pluviométricas, com densidade de postos pluviométricos de uma estação a cada 8 mil quilômetros quadrados, e apenas 154 estações automáticas, com densidade estimada de uma estação a cada 25 mil quilômetros quadrados, se for considerada a área de 3.717.033 km² do território da bacia Amazônica no Brasil. Ambos os valores estão abaixo do valor mínimo de estações de monitoramento de chuva recomendados pela WMO (2008), assemelhando-se a valores de regiões polares ou áridas.

Em adição, cabe destacar a limitada distribuição espacial das estações pluviométricas na região Amazônica, com 237 estações existentes na parte brasileira dessa bacia, perfazendo uma densidade de apenas uma estação pluviométrica a cada 14.000 quilômetros quadrados no território brasileiro. Observa-se que, em geral, há monitoramento dos níveis de água e, por consequência, da vazão em bacias de tamanho significativo nos grandes rios brasileiros, da ordem de milhares de quilômetros quadrados, respeitando, em geral, demandas do setor elétrico, implantação de hidrovias e fenômenos de cheias em diversas partes do país. Mais recentemente, o enfoque tem sido no sentido de diversificar a implantação de estações de monitoramento, contemplando, quando possível, bacias de menor porte, da ordem de centenas de quilômetros quadrados. No entanto, esse esforço ainda é incipiente e, até certo ponto, de trabalhos e projetos experimentais conduzidos por instituições nacionais de pesquisa.

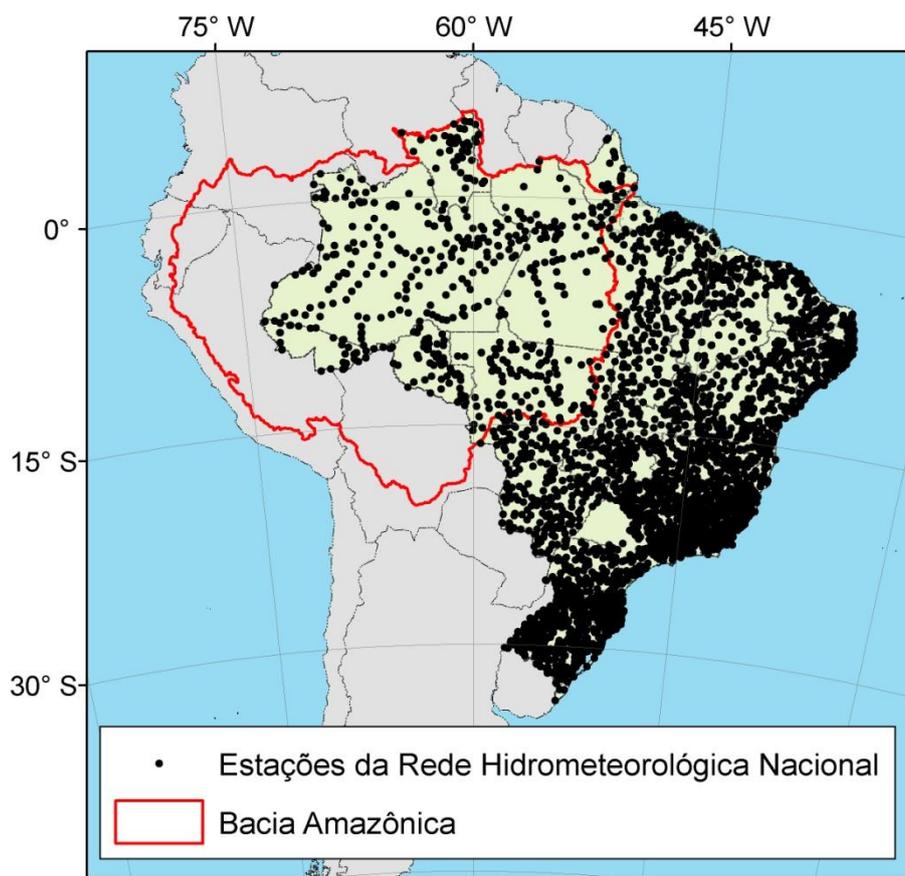


Figura 4.2 – Pontos de monitoramento da rede hidrometeorológica nacional (Fonte: ANA – endereço eletrônico acessado em 10/04/2016)

Nessa avaliação das informações hidrometeorológicas disponíveis, não se pode deixar de referenciar a relativamente e recente base de dados de imagens de sensoriamento remoto, que começam a integrar os bancos de dados nacionais. Por exemplo, a partir do trabalho de SILVA (2010), foi construída uma base de dados de dados altimétricos na bacia Amazônica, em especial para a bacia do rio Negro, afluente do rio Solimões na região de Manaus, usando-se o conceito de estações virtuais então adotado. Mais recentemente, a ANA tem procurando implantar uma estruturação de banco de dados que acolha informações alfanuméricas e de imagens, que passa, aos poucos, a complementar informações coletadas *in situ*, até certo ponto precárias, de monitoramento do nível de água de rios de maior porte, com largura de cerca de 1 km ou maior, como é o caso dos rios amazônicos.

Adicionalmente, dentre as características que são possíveis de se observar por redes locais de monitoramento e, em especial, mais recentemente, por satélite, pode-se dar ênfase especial à medição de precipitação. RIBEIRO NETO (2006), a título de ilustração, levantando informações de estações pluviométricas durante o período de 1920 a 1980, ao redor do globo, estimou a precipitação média da bacia Amazônica na ordem de 2.300 mm por ano, com uma variação estimada de 200 mm por ano até 6.000 mm por ano dependendo da localidade, sendo os 6000 mm encontrados na região andina. Tais informações são bastante próximas aos valores das estimativas de precipitação por satélite do TRMM-3B42 (HUFFMAN *et al.*, 2007), adquirida com resolução espacial de 0,25 grau por 0,25 grau (cerca de 25 km²) e resolução temporal diária. Os autores encontraram, para dados desse satélite, valores de 6300 mm por ano para a região andina, correspondente ao território da Bolívia, e valores menores de precipitação de cerca de 450 mm por ano em outras porções da Amazônia, com uma média do total anual para a bacia Amazônica de aproximadamente 2400 mm por ano.

Nesta tese, com fins de caracterização dessa informação oriunda do satélite, esses valores foram obtidos usando as séries do TRMM do período de 2001 até 2014, conforme pode ser observado na Figura 4.3.

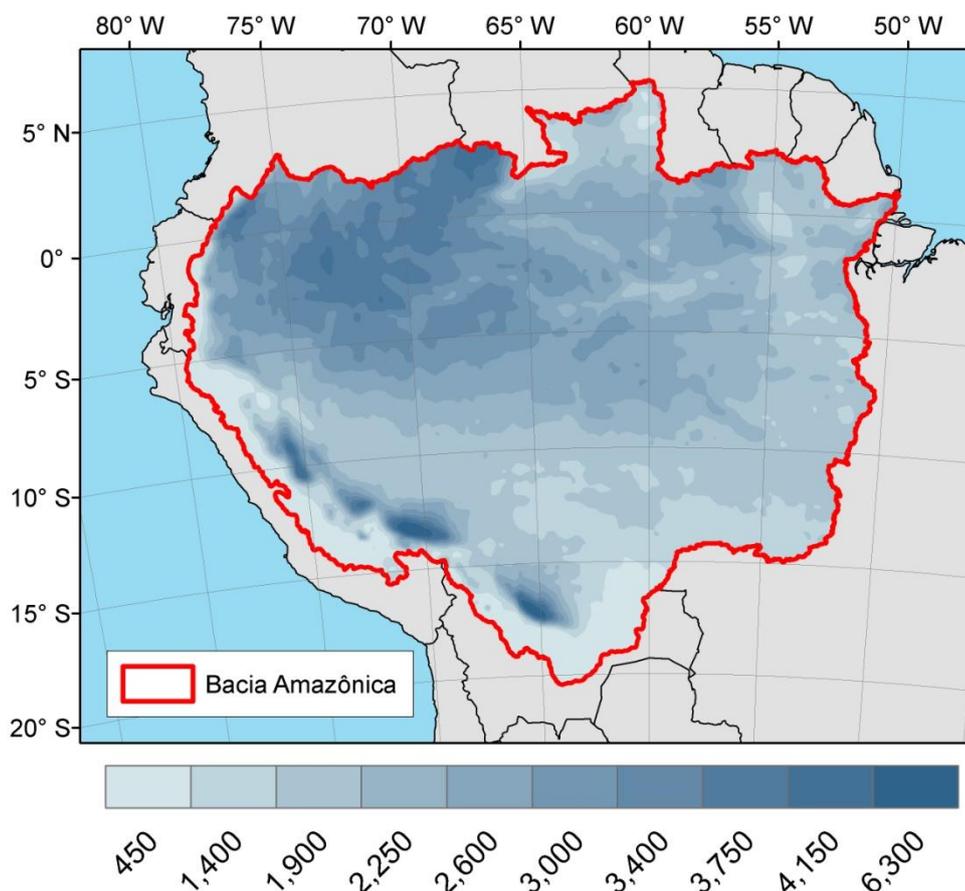


Figura 4.3 – Valores de precipitação total anual média em milímetros estimadas pela missão espacial TRMM para os anos de 2001-2014.

RIBEIRO NETO (2006) relata, ainda, que, a partir de suas observações, pode-se caracterizar a estação chuvosa no sul da Amazônia iniciando-se em setembro/novembro com máximos de chuva identificados entre dezembro e fevereiro. A maior concentração de chuvas da porção norte da bacia ocorre de maio a julho. Na parte central, desde o oeste até a foz do rio Amazonas, os máximos de chuva ocorrem de março a maio. Novamente, usando os dados da missão TRMM, foram encontrados valores consistentes com os resultados de RIBEIRO NETO (2006), podendo-se visualizar essas informações na Figura 4.4.

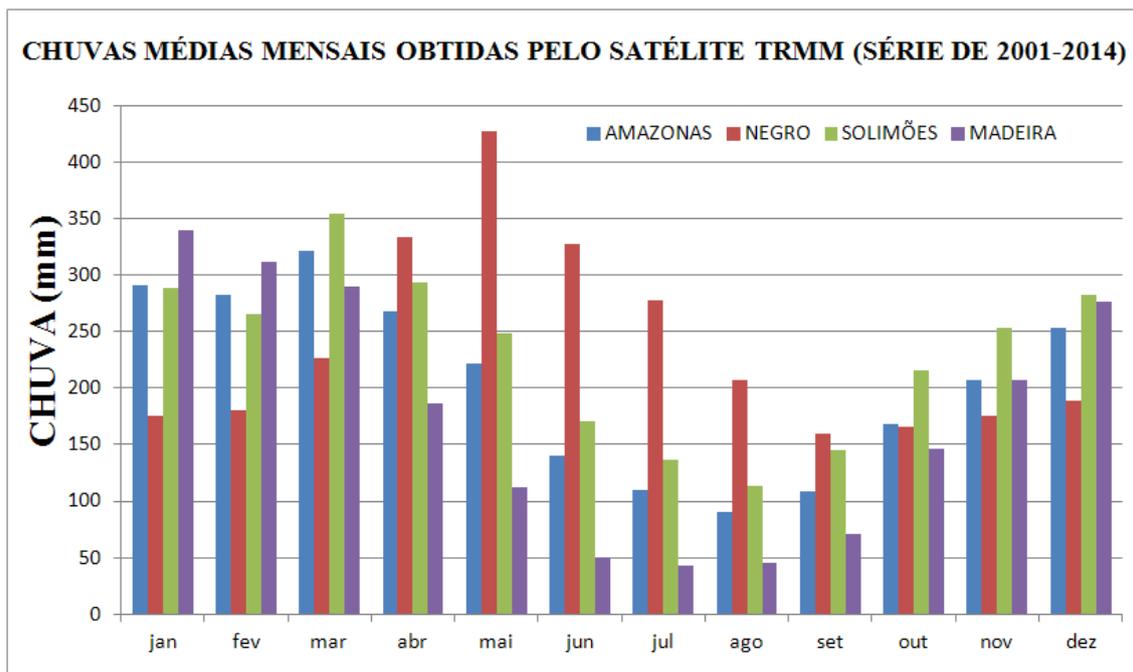


Figura 4.4 – Valores de precipitação total anual média em milímetros para a bacia Amazônica e suas principais sub-bacias estimadas pela missão espacial TRMM para os anos de 2001-2014.

Pela Figura 4.4, pode-se observar em conjunto com a Figura 4.1, onde estão situadas as bacias que receberam particular enfoque nesta tese, que a bacia do rio Negro, situada na parte norte da bacia Amazônica, tem um regime de chuvas diferenciado em relação a outras bacias, conforme foi também destacado por RIBEIRO NETO (2006). Essa bacia recebeu especial atenção nos estudos de GETIRANA (2009), SILVA (2010) e XAVIER (2012).

A outra fonte principal de informação hidrológica monitorada por redes de monitoramento hidrometeorológica, como previamente mencionado e que recebeu atenção especial nesta tese, são as informações de níveis de água de cursos de água, sobretudo na bacia Amazônica, que possui 273 estações de monitoramento de cursos de água, chamadas também de estações fluviométricas. O estudo de GUYOUT *et al.* (1999) destaca variações de 2 a 18 metros nos níveis de água para os rios amazônicos ao longo do ciclo hidrológico anual dessa bacia. Como destaque, há registro de nível máximo para a estação fluviométrica do Porto de Manaus, situada no centro da bacia, próxima à foz do rio Negro, de 29,97 metros medidos em 29/05/2012 e registro de valor mínimo medido 13,63 metros medido no dia 24/10/2010, que resultam em uma variação de 16,34 metros entre os extremos medidos. Essas variações podem ser observadas nas

Figuras 4.5 e 4.6, corroboradas usando dados de satélites altímetros apresentadas no trabalho de SILVA (2010).



Figura 4.5 - Foto da cheia máxima registrada no porto de Manaus (Créditos SUREG-MA).



Figura 4.6 - Foto da vazante máxima registrada no porto de Manaus (Créditos SUREG-MA).

Conforme explicitado no capítulo introdutório, essa fonte de informação de níveis de água armazenada nos bancos de dados das redes de monitoramento, a citar o caso da rede hidrometeorológica nacional, encontra-se associada a referenciais arbitrários, o que limita severamente a análise adequada e consistente dos dados, em seu conjunto, de forma integrada, para a modelagem hidrológico-atmosférica na bacia

Amazônica, e limita, portanto, a aplicação desses dados em estudos hidráulicos, hidrodinâmicos, hidrológicos e atmosféricos na região.

Estudos recentes, como delineados em CAMPOS (2004) e em MOREIRA (2010), contribuíram, a partir de levantamentos de receptores GNSS geodésicos, na obtenção de altitudes do zero dessas estações fluviométricas. Ainda que com uma menor precisão na estimativa, CAMPOS (2004), SILVA (2010) e HALL *et al.* (2011) propuseram, também, como forma de referenciamento do zero de estações, avanços no uso da altimetria espacial em locais nos quais a aquisição de dados ocorre em regiões próximas a estações fluviométricas. Diversos estudos, em maior ou menor grau de limitação, acabam recorrendo a dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (FARR *et al.* 2007). Os dados do modelo digital de elevação SRTM, com resolução espacial de 90 metros, podem ser observados na Figura 4.7.

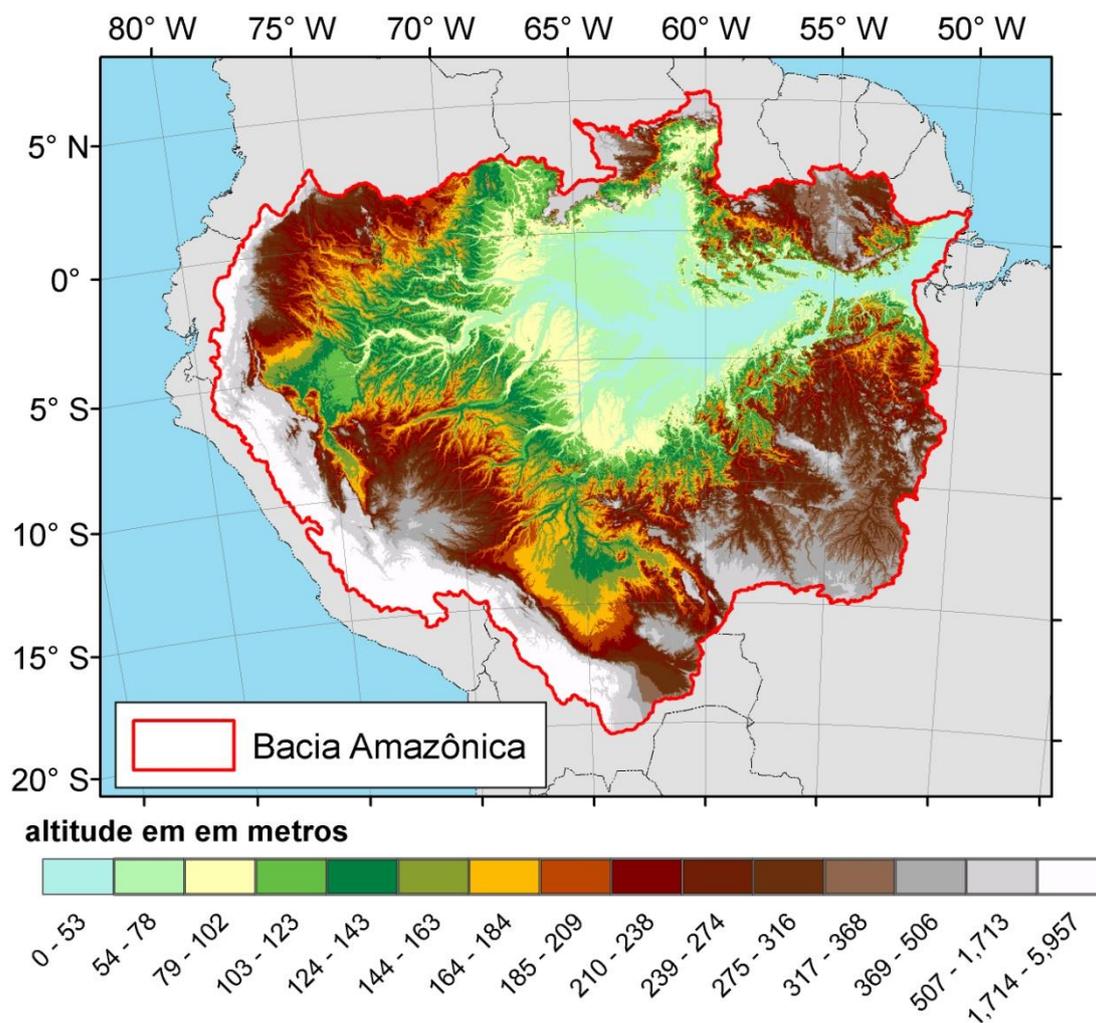


Figura 4.7 – Valores de altitudes derivados do modelo digital de elevação (MDE) SRTM.

Os valores de altitudes descritos pelo SRTM são similares aos apresentados por GYOUT (1993), com valores estimados de 6000 metros de altitude para os Andes bolivianos.

Sobre outras características hidrometeorológicas, geomorfológicas e fisiográficas, podem ser consultadas outras publicações realizadas no âmbito do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – COPPE, a se destacar os trabalhos de RIBEIRO NETO (2006), GETIRANA (2009), SILVA (2010) e XAVIER (2012).

No presente estudo, foram realizados esforços na melhoria de qualidade e quantidade da informação de níveis de água de cursos de água existentes na bacia Amazônica, mediante a realização de campanhas de campo, conjuntamente com com

dados de satélite e histórico de medições *in situ*, conforme apresentado no item subsequente.

4.1 Campanhas de campo realizadas no âmbito da tese

Considera-se relevante destacar o conjunto de campanhas conduzidas para atingir o objetivo da tese segundo a abordagem metodológica proposta. Na Figura 3.1, encontram-se agrupados os procedimentos para tratamento da informação altimétrica, com detalhes metodológicos apresentados no Capítulo 3 e resultados dispostos e comentados ao longo do Capítulo 5.

A partir da Figura 3.1, para cumprir a etapa de “Levantamentos Hidrológicos” foram realizadas dezesseis (16) campanhas de campo no âmbito de desenvolvimento de presente tese. Essas campanhas aconteceram no contexto da execução da operação da rede hidrometeorológica nacional, sendo essa atividade realizada sob responsabilidade da Superintendência Regional de Manaus do Serviço Geológico do Brasil (CPRM-SUREG-MA), no âmbito do projeto Dinâmica Fluvial (parceria IRD/CPRM) e campanhas do projeto HYBAM.

Nessas campanhas de campo, normalmente, executam-se as atividades ligadas ao monitoramento hidrológico convencional que envolve medições de vazão, coleta de registros dos observadores hidrológicos, pagamento dos observadores e manutenção das estações hidrometeorológicas. Essas campanhas são realizadas através de uma embarcação de madeira tipicamente amazônica que pode ser observada na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Embarcação típica da Amazônia, que fornece o suporte para a realização da maioria das campanhas de campo de visita às estações hidrometeorológicas da região.

Na embarcação, são levados todos os equipamentos necessários para realizar medições hidrológicas e manutenção das estações. A embarcação possui as condições necessárias para estadia dos técnicos e tripulantes na embarcação, o que, normalmente, tem a duração mínima de três (3) semanas para execução total das atividades previstas segundo o cronograma usual das campanhas de operação da rede hidrometeorológica nacional.

As campanhas de campo foram aproveitadas para duas atividades fundamentais desenvolvidas nesta tese, sendo a primeira a coleta de dados de nível de linha de água através de receptores geodésicos GNSS, que foram obtidos a partir da instalação da antena desses receptores sobre os barcos fluviais. A segunda atividade diz respeito à parada do barco nos locais de estações fluviométricas para manutenção. Aproveitou-se o itinerário da campanha para se realizar a ocupação da referência de nível arbitrária dessa estação por antenas de receptores GNSS, com objetivo prioritário para obter a altitude do zero das estações fluviométricas e criar pontos de validação para os perfis de linha de água através de receptores GNSS obtidos pelas embarcações.

Essas campanhas tiveram duração total de 169 dias. Na Figura 4.9 e na Tabela 4.2, pode-se observar as características das campanhas realizadas, com seu início, duração, distância percorrida e se foi possível coletar dados do GLONASS em adição a dados do GPS ou apenas dados do GPS.

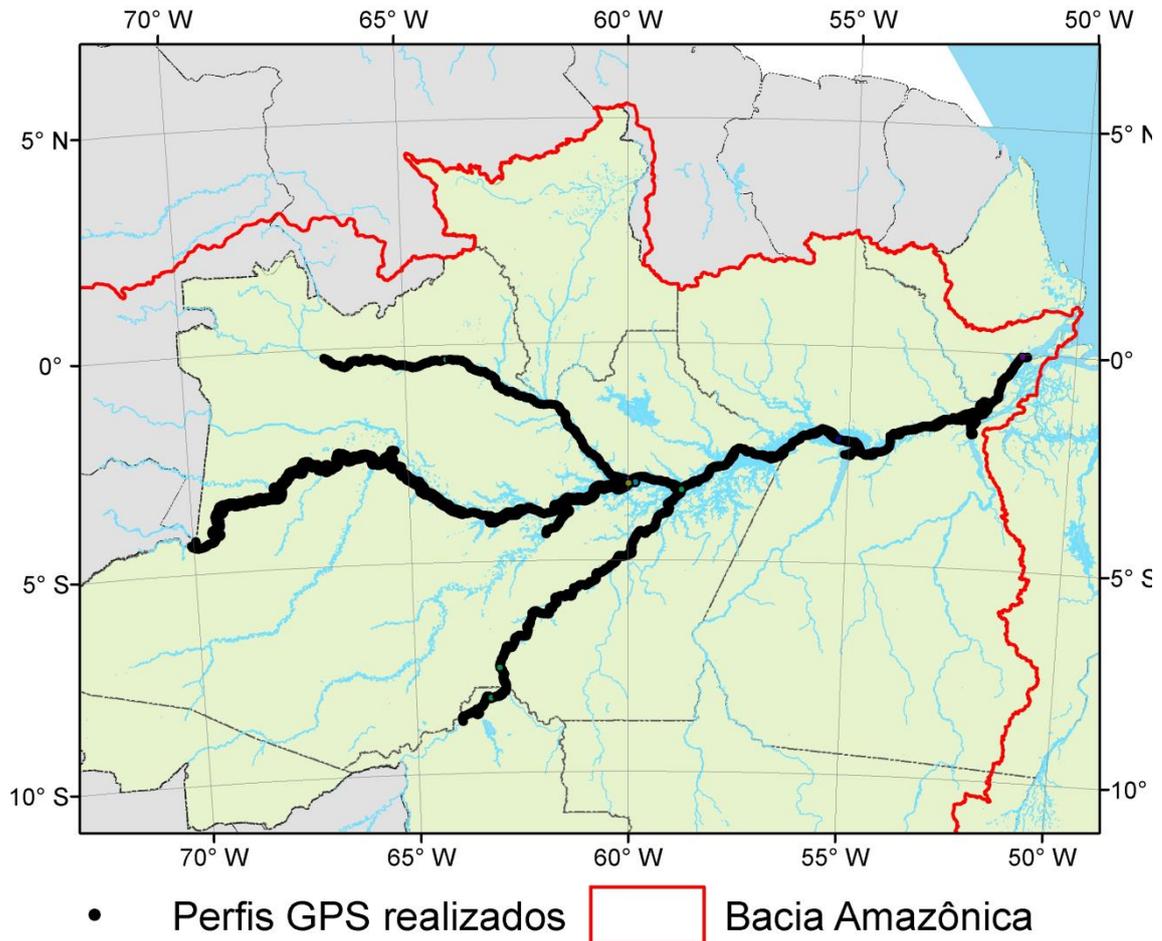


Figura 4.9 - Perfis longitudinais dos principais rios amazônicos em território brasileiro, levantados a partir do uso de receptores GPS.

Tabela 4.2 – Campanhas de campo realizadas de 2009 a 2014, que forneceram dados para obtenção de perfis longitudinais e obtenção da altitude do zero de réguas.

RIO	DATA DE INÍCIO	DURAÇÃO	DISTÂNCIA (km)	GLONASS
NEGRO	setembro-09	14	944	
NEGRO	outubro-09	5	944	
MADEIRA	novembro-09	6	1066	
MADEIRA	novembro-09	7	1014	
MADEIRA	março-10	8	1022	
SOLIMÕES-AMAZONAS	junho-10	19	2150	
NEGRO	novembro-10	11	842	
NEGRO	dezembro-10	6	934	
MADEIRA	julho-11	7	962	
SOLIMÕES	novembro-11	10	1290	
SOLIMÕES-AMAZONAS	fevereiro-13	9	1525	SIM
SOLIMÕES-AMAZONAS	setembro-13	13	1472	SIM
SOLIMÕES-AMAZONAS	setembro-13	15	1675	SIM
MADEIRA-AMAZONAS	outubro-13	11	1625	SIM
SOLIMÕES-AMAZONAS	março-14	20	1684	SIM
SOLIMÕES	abril-14	8	1275	SIM
TOTAL	-----	169	20424	6

Essas campanhas foram realizadas em diferentes períodos do ciclo hidrológico permitindo a possibilidade de coleta de perfis longitudinais dos rios amazônicos em diferentes condições hidrológicas, conforme pode ser visualizada na Figura 4.10 na comparação das datas das campanhas com o nível de água registrado na estação fluviométrica do porto de Manaus, sendo Manaus o ponto de partida e chegada de todas as 16 campanhas realizadas.

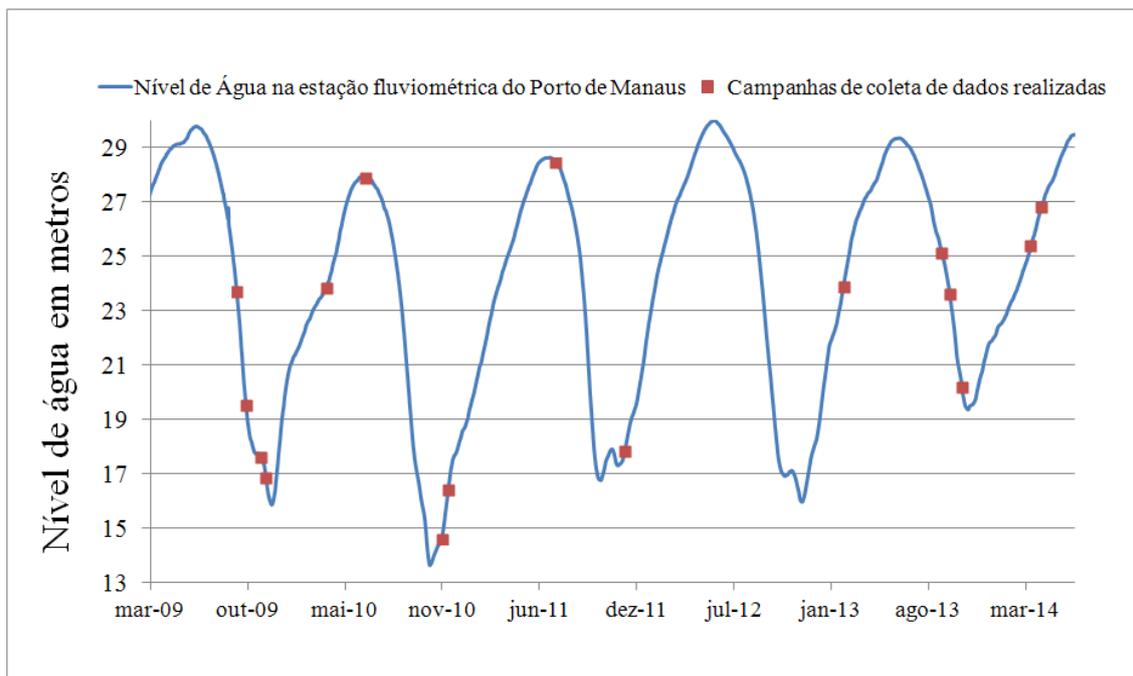


Figura 4.10 - As dezesseis (16) campanhas de campo realizadas no âmbito do presente estudo em relação a variação da cota registrada no Porto de Manaus.

Em síntese, durante as campanhas de campo realizadas pela CPRM e seus parceiros, foi possível obter valores de altura de linha de água da parte brasileira dos maiores rios amazônicos, sendo possível, também, levantar dados através de receptores GNSS ao longo de mais de 20.000 quilômetros de perfis fluviais distribuídos ao longo dos rios Negro, Solimões, Madeira e Amazonas conforme expostos na Figura 4.8 e na Tabela 4.1. Nessas campanhas, também foi possível realizar a ocupação por receptor GNSS das referências de nível de quase sessenta estações fluviométricas.

No Capítulo 5, são detalhadamente expostos resultados associados à questão científica do trabalho, complementares a diversas análises e avaliações até o momento apresentadas ao leitor, a partir do quadro de coleta de dados conformedo pelas dezesseis (16) campanhas realizadas que forneceram o conjunto de informações necessárias para desenvolvimento desta tese.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

Neste capítulo, serão descritos os resultados obtidos durante a realização do presente trabalho de acordo com a metodologia proposta no Capítulo 3.

Cabe destacar as propriedades espaciais e temporais dos resultados obtidos, que refletem as suas quatro dimensões, requerendo que alguns destes, principalmente os referentes a deslocamentos do barco, sejam mais bem delineados mediante meios digitais e códigos computacionais adequados. Gerou-se uma quantidade significativa de análises, principalmente a partir de dados de receptores GPS, que permitiram a coleta de três tipos de dados. Mais especificamente, tratam-se, nesta tese, dados de estações permanentes, dados de pontos fixos em estações fluviométricas e dados cinemáticos a partir de receptores GPS a bordo de embarcações.

Com o objetivo de garantir a qualidade e a consistência entre todas as informações, processaram-se os dados utilizando as técnicas apresentadas no Capítulo 3, associadas ao estado da arte de processamento de dados GNSS. O processamento de dados obedeceu aos procedimentos, os modelos e os padrões de rigor necessários segundo as convenções preconizadas por IERS (2010), adicionando-se, em especial, a correção de carga hidrológica a partir das séries do GRGS, que foram melhor avaliadas e apresentadas no Capítulo 3, onde se estabelece e se fundamenta a diretriz metodológica da tese.

Na exposição textual que segue, as seções foram organizadas para descrever e refletir sobre algumas das importantes informações que podem ser recuperadas ou reproduzidas no âmbito da hidrologia a partir do uso de receptores GPS. Os resultados serão expressos discriminados em itens, de modo a respeitar a ordem cronológica dos processos executados, que podem ser resumidos em três vertentes, a saber:

- resultados das altitudes do zero das réguas obtidos por levantamento realizado através de receptores GPS nas estações fluviométricas, definindo-se o valor elipsoidal associado com o zero da escala das réguas linimétricas e aplicação do modelo do geopotencial EGM08;

- resultados dos perfis de linha de água adquiridos via receptores instalados sobre embarcações, a fim de descrever corretamente as características hidrodinâmicas dos trechos de estudo e a obtenção da altitude do zero de estações fluviométricas de forma eficiente e eficaz, sem necessidade de instalação do equipamento GNSS na estação fluviométrica;
- comparação entre o conjuntos de dados referentes a níveis de água e a perfis longitudinais referenciados, obtidos por meio de receptores GNSS, e os dados adquiridos através da tecnologia de altimetria espacial, de forma a apresentar erros e potencialidades dessa importante técnica de sensoriamento remoto.

5.1 Obtenção de altitudes do zero das réguas linimétricas

No procedimento clássico de obtenção de altitude do zero das réguas linimétricas por receptores GPS, é feita a ocupação física da estação fluviométrica por receptores GPS, de forma a dar uma boa estabilidade à antena do receptor, aliando-se a condições de não interferência dos sinais GPS. Essas antenas podem ser posicionadas nos lances das réguas, na referência de nível (RN) da estação fluviométrica (Figura 5.1) ou em algum local para posterior nivelamento geométrico da antena para a referência de nível.

Adicionalmente, mede-se a diferença de altura entre o ponto de referência da antena e o valor da cota arbitrária da RN de forma a determinar a sua altitude, o que permite, posteriormente, a conversão a uma referencia global das leituras das réguas feitas pelo aqui denominado observador hidrológico.



Figura 5.1 - Ocupação de um lance de régua por receptor GPS para obtenção de altitude do zero da estação fluviométrica de Porto União (rio Amazonas).

Como norma 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, que são menos estáveis, sejam frequentemente nivelados em relação à referência de nível arbitrária. Normalmente, como zero dessa referência, 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 tenham seus valores sempre positivos. A título de ilustração, a Figura 5.2 apresenta uma referência de nível (RN).



Figura 5.2 - Referência de nível (RN) utilizada para nivelamento geométrico das réguas linimétricas, com referência arbitrária.

Seguindo os procedimentos mencionados acima, dados de altitude dos zeros das réguas linimétricas foram obtidos a partir de ocupações de antenas de receptores GPS nos lances de réguas fluviométricas, de forma análoga ao reproduzido na Figura 5.1, seja durante as campanhas de campo apresentadas na Tabela 4.2 ou seja aproveitando dados GPS de campanhas anteriores, que não puderam ser processados devido à limitação no uso de ferramenta computacional ou limitação de técnicas de processamento existentes em período anterior.

Durante o período de execução das campanhas de campo, também foram instaladas antenas de receptores GPS no topo de barcos, e esses dados puderam ser aplicados na criação de novo procedimento para obtenção da altitude do zero das réguas de forma rápida, sem ocupação de receptores na régua ou RN e utilizando apenas a passagem do barco pela estação fluviométrica. A obtenção da altitude do zero de uma régua fluviométrica utilizando a passagem do barco pode ser obtido pela relação

$$Z_0(t) = H_{GPS} - H_{antena} - L_{régua} \quad (5.1)$$

onde o H_{GPS} é o valor da coordenada vertical obtida para a antena instalada no barco no seu ponto de referência (ARP), H_{antena} é a altura da antena em relação à superfície de água e $L_{régua}$, a leitura da régua no nível arbitrário.

Esse procedimento foi criado devido à restrição de tempo, que impossibilitou, durante algumas campanhas, a visita de manutenção a todas as estações fluviométricas existentes ao longo do trajeto percorrido pelo barco. Essa limitação, em grande parte, é, de fato, causada em função do tempo de execução do levantamento. Note-se que, para a obtenção da altitude do zero da régua por GPS, é ideal a ocupação da régua por pelo menos seis horas, de modo a garantir uma boa estimativa das ambigüidades no método PPP e correções no processamento GPS com a finalidade de obter um nível centimétrico de precisão. Por outro lado, quando da utilização de dados GNSS obtidos por antenas instaladas no topo de barcos, o GPS está constantemente coletando informações, o que permite o aproveitamento das informações coletadas em etapas anteriores e posteriores à passagem do barco pela estação fluviométrica e, portanto, por réguas linimétricas. Diante desse cenário, torna-se possível obter as informações necessárias para as correções do processamento GNSS com a finalidade de atingir a precisão centimétrica, conforme metodologia proposta, com resultados de desempenho apresentados no Capítulo 3. A Figura 5.3 permite visualizar o barco e os correspondentes receptores nele instalados.

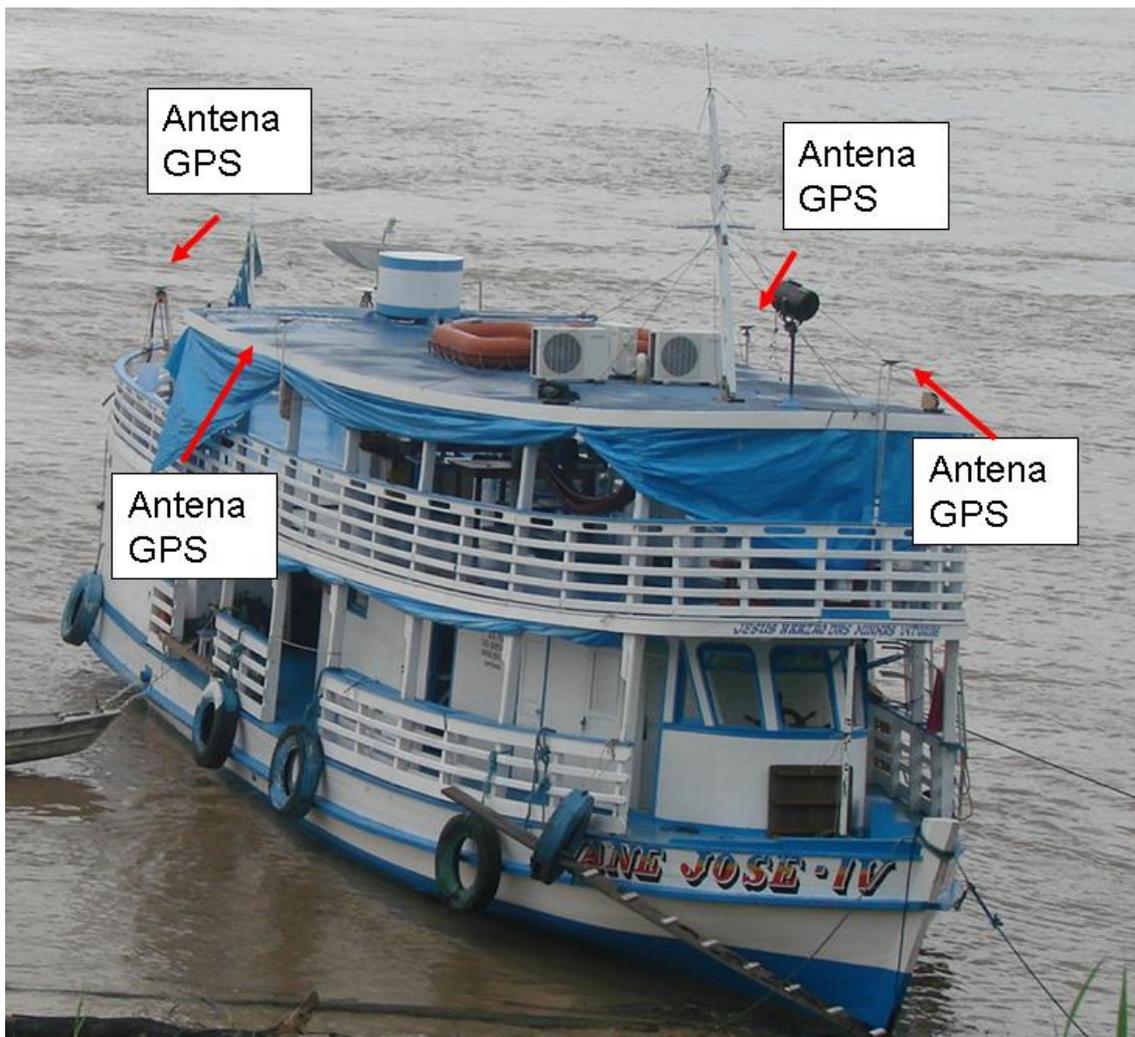


Figura 5.3 - Instalação de receptores e antenas GPS no barco.

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, que possibilita a correção e/ou redução dos efeitos de movimentos aleatórios do barco, conforme mostrado na Figura 5.3.

Cabe-se ressaltar que tais perfis só puderam ser processados, com a qualidade almejada, através das recentes inovações implementadas no código computacional GINS-PC, destacando melhorias no pré-processamento de dados e na solução de ambigüidades inteiras do código computacional de processamento, descritas no Capítulo 3, que foram fundamentais para a realização deste estudo.

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 incompatíveis com representação de perfis longitudinais dos rios e dados das

coordenadas verticais obtidas que tiveram resíduos estimados durante o processamento muito elevados das soluções verticais (exemplo dados com resíduos maiores que 10 cm). Conforme anteriormente falado, a utilização de informação de dados simultâneos coletados a partir de vários receptores GPS sobre o barco, a correta instalação da posição das antenas e a execução de vários percursos sobre o mesmo trajeto proporcionam que os dados obtidos por receptores GPS sejam descritos com a declividade mais adequada.

Uma questão fundamental na produção dos perfis é a redução das alturas de antena do barco para a altura da linha de água. Entretanto o barco possui alturas de antena maiores que cinco (5) metros em relação à superfície de água, e algumas soluções tiveram que ser aplicadas para obter resultados mais coerentes devido ao movimento constante do barco.

Duas soluções foram aplicadas para a obtenção do desnível das antenas sobre os barcos em relação à superfície de água. A primeira solução diz respeito à utilização de processamento em método de dupla diferença a partir de receptores instalados no barco e na régua, de modo a fornecer 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 superfície de água, podendo-se aplicar as diferenças para obtenção da altura da antena do barco em relação à régua, sendo escolhido o período em que a régua e o barco estão próximos o suficiente para não haver declividade da linha de água entre ambos (Figura 5.4).



Figura 5.4 - Exemplo das estações utilizadas em dupla diferença para obtenção da diferença de altura entre a antena do receptor GPS do barco e a superfície da água.

A outra solução apresentada para a obtenção das diferenças de altura, como forma de comparação dos resultados de dupla diferença, foi a utilização de mais de uma técnica, como, por exemplo, o de nivelamento geométrico, assumindo-se o nível estacionário no entorno da régua linimétrica (Figura 5.5).



Figura 5.5 - Exemplo de nivelamento geométrico das alturas da antena do barco.

Uma outra correção importante para se analisar na produção de perfis longitudinais dos rios amazônicos é observar a variação do nível de água 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 vários dias, há necessidade de correção da taxa de subida e de descida do nível de água do rio ao longo do tempo; esse procedimento pode ser feito utilizando leituras obtidas através das réguas linimétricas encontradas durante o percurso, analisando seus dados antes e depois de realizados os levantamentos por receptores GPS, na passagem do barco por aquele ponto.

A correção final para dados cinemáticos já processados, conforme já descrito em informações anteriores, é a aplicação do modelo do geopotencial para a transformação das altitudes geométricas (elipsoidais), obtidas no levantamento GPS cinemático, em altitudes físicas (ortométricas referenciadas ao geóide), possibilitando a descrição mais adequada dos processos hidrodinâmicos. Para essa conversão de altitudes dos dados

cinemáticos, considerou-se o modelo do geopotencial EGM08, como já previamente mencionado no Capítulo 2.

O conjunto de dados obtidos ao longo das diversas campanhas realizadas, descritas com maiores detalhes no Capítulo 4, proporcionaram observação e posterior obtenção da altitude do zero de mais de sessenta (60) estações fluviométricas, os quais foram processados no código computacional GINS, seguindo o procedimento de processamento PPP anteriormente descrito no Capítulo 3. Os resultados, obtidos no processamento, tiveram a correção dos fenômenos de carga hidrológica, já anteriormente também apresentados, bem como a correção de outros fenômenos comuns ao processamento de dados no método PPP. As altitudes elipsoidais, obtidas do processamento dos dados GNSS, mediante posterior obtenção da altitude dos zeros das réguas linimétricas, foram reduzidas ao geóide por meio do emprego do modelo do geopotencial EGM08, possibilitando que essas informações possam, então, ser aplicadas em futuros estudos hidrodinâmicos. A Figura 5.6 apresenta a localização espacial das estações aos quais foram obtidas as altitudes do zero das réguas durante o estudo aqui empreendido.

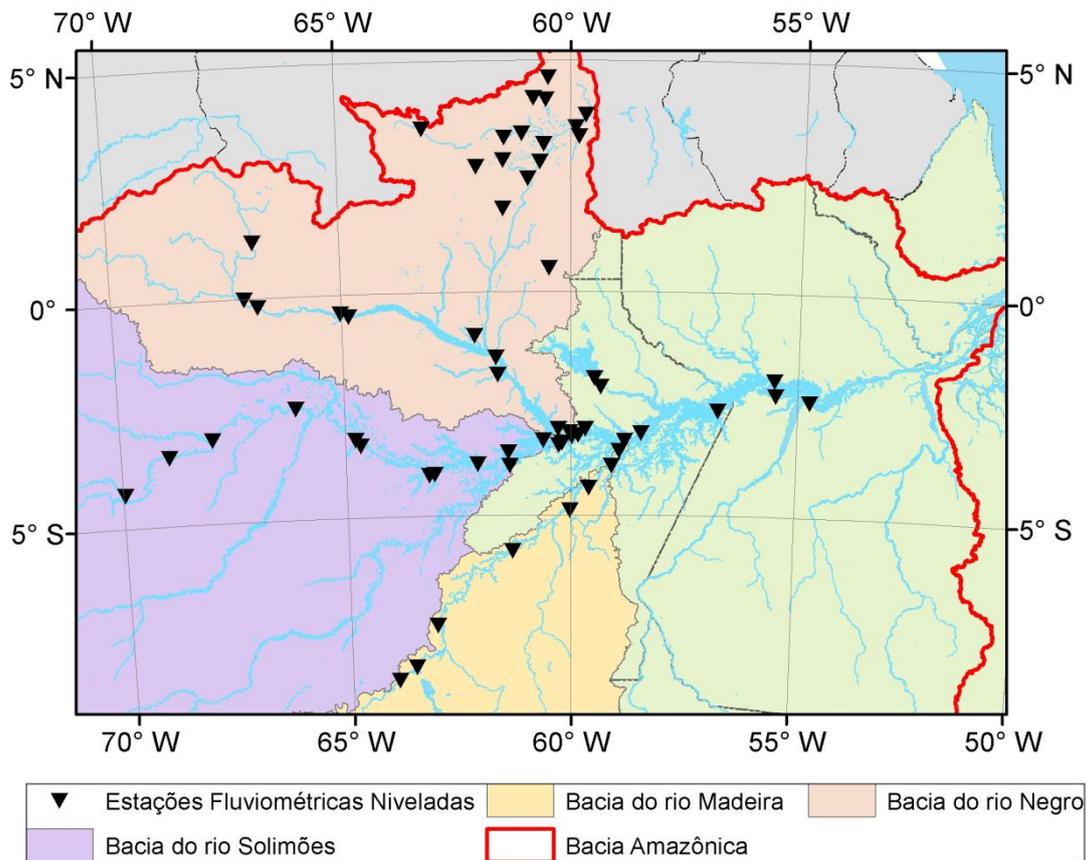


Figura 5.6 – Estações fluviométricas cuja altitude do zero da régua foi obtida a partir de receptores GPS durante a realização do presente estudo.

Na Tabela 5.1, são apresentadas altitudes dos zeros das régua (em metros) em relação ao modelo do geopotencial EGM08, resultados esses que foram obtidos apenas por ocupação fixa a partir de receptores GPS instalados em lances de régua linimétricas ou em referências de nível dessas mesmas régua.

Tabela 5.1 – Valores de altitude do zero das réguas definidos apenas por pontos fixos adquiridos pela ocupação direta de estações fluviométricas por receptores GPS.

Código		zero da régua
Hidroweb	Nome da estação	(em metros)
17060000	VILA_CURUAI	-0,02
14110000	CUCUI	57,46
14320001	SAO GABRIEL	43,71
14428000	VILA_CONCEICAO	26,14
14488000	UAICAS	299,65
14489000	MARACA	76,99
14495000	FAZENDA_CAJUPIRANGA	67,50
14515000	FAZENDA_PASSARAO	58,96
14526000	BOMFIM	71,07
14527000	PONTE_DO_TACUTU	65,98
14529000	FAZENDA_NOVO_DESTINO	74,48
14530000	VILA_SURUMU	112,99
14540000	FAZENDA_BANDEIRA_BRANCA	626,31
14550000	MALOCA_DO_CONTAO	99,18
14620000	BOA_VISTA	56,18
14650000	POSTO_FUNAI	160,23
14680001	FE_ESPERANCA	70,60
14690000	MUCAJAI	45,60
14710000	CARACARAI	36,51
14845000	FAZENDA_SAO_JOSE	49,54
14876000	SERINGALZINHO	4,80
16080000	LAGO_BALBINA	-2,46
16100000	CACHOEIRA_MORENA	12,53

A Tabela 5.2, por sua vez, busca refletir os resultados referentes à obtenção da altitude do zero de estações fluviométricas por meio de dois procedimentos. No primeiro procedimento, define-se o valor de referência aqui denominado de “zero fixo”,

estabelecido para o zero da régua linimétrica por ocupação da estação fluviométrica por antenas de receptores GPS instalados por mais de 6 horas de duração em lances de régua ou referências de nível. No procedimento alternativo, os valores de altitude do zero de estações fluviométricas são obtidos a partir de antenas de receptores GPS instalados a bordo de barcos, mediante coleta de pequena quantidade de coordenadas instantâneas a partir da passagem do barco pela régua. Na Tabela 5.2, pode ser observado o número de vezes (N) que o barco passou pela régua citada nas 16 campanhas realizadas. Calcularam-se, ainda, a média e a mediana das diferenças entre os valores de zero obtidos (em metros) em todas as passagens do barco pela régua em relação ao valor obtido pelo método de ocupação fixa de mais de 6 horas da antena do receptor instalado no lance de régua. Complementarmente, para avaliar a confiabilidade do procedimento expedito e simplificado, determinou-se a média dos desvios (em metros) dos valores obtidos de zero da régua mediante o emprego do método de levantamento cinemático para cada passagem do barco. Os valores informados (em metros), na Tabela 5.2, têm, como referência, o modelo do geopotencial EGM08.

Tabela 5.2 Valores de altitude do zero de réguas linimétricas obtidos por pontos fixos (zero fixo) em contraste com valores do zero definidos a partir de dados cinemáticos adquiridos pela passagem de receptores GPS a bordo de barcos pela estação fluviométrica.

CÓDIGO	ESTAÇÃO	ZERO FIXO(m)	N	MEDIANA(m)	MÉDIA (m)	DESVIO (m)
17050001	OBIDOS_LINIGRAFO	3,58	7	0,007	0,011	0,024
17050002	OBIDOS_MD	3,58	35	0,009	0,003	0,028
10100000	TABATINGA	56,40	8	-0,116	-0,121	0,031
17900000	SANTAREM	1,92	7	0,008	0,015	0,034
14911000	TATU	-7,22	16	-0,028	-0,035	0,044
15400000	PORTO_VELHO	42,73	10	0,037	0,029	0,053
14990000	MANAUS	-7,00	49	-0,001	-0,003	0,055
14330000	CURICURIARI	30,80	8	0,037	0,031	0,057
14420000	SERRINHA	22,11	5	-0,083	-0,099	0,058
16030000	ITACOATIARA	3,76	16	0,130	0,125	0,058
11400000	SAO_PAULO_DE_OLIVENCA	45,12	4	-0,010	-0,045	0,083
15960000	URUCURITUBA	-1,15	15	0,029	0,007	0,062
16350002	PARINTINS	5,45	7	-0,064	-0,072	0,071
15040000	CAREIRO	4,77	6	0,510	0,523	0,071
15900000	BORBA	1,71	12	-0,055	-0,056	0,074
15700000	MANICORE	6,81	14	0,045	0,015	0,084
14101000	IRANDUBA	3,49	16	-0,102	-0,140	0,090
14840000	MOURA	9,26	3	-0,192	-0,135	0,102
15630000	HUMAITA	24,26	14	0,062	0,011	0,106
14400000	TAPURUQUARA	25,21	10	0,059	0,075	0,115
14050000	ANAMA	9,02	20	-0,119	-0,094	0,131
14201000	SANTA_LUZIA	1,47	16	0,112	0,111	0,139
15860000	FAZENDA_VISTA_ALEGRE	3,28	13	-0,073	-0,004	0,150
13150000	ITAPEUA	14,74	18	-0,370	-0,303	0,185
15940000	NOVA_OLINDA_DO_NORTE	0,92	6	-0,191	-0,122	0,200
15042200	IRACEMA	1,83	26	0,140	0,152	0,250
14100000	MANACAPURU	4,31	30	-0,137	-0,008	0,373
13155000	CODAJAS	11,58	13	-0,244	-0,049	0,396
13980000	PARICATUBA	6,73	9	0,152	-0,005	0,409
15030000	JATUARANA	3,11	29	-0,141	-0,138	0,421
12900001	TEFE_MISSOES	22,17	14	-0,325	-0,052	0,627
12351000	FONTE_BOA	22,88	10	-0,280	-0,051	0,658
12873000	LARANJAL	22,71	5	-0,927	-0,475	0,895
MEDIA			14	-0,064	-0,027	

Os valores apresentados na Tabela 5.2 foram, propositadamente, ordenados do menor para o maior valor de desvio médio, pois essa classificação permite salientar que os menores valores obtidos de desvio estão coerentes com a precisão do processamento cinemático apresentado no Capítulo 3.

Por outro lado, os valores de maiores desvios estão associados a erros inerentes ao procedimento de obtenção de altitude do zero de forma cinemática a partir da passagem do barco equipado com receptor GNSS. Provavelmente, esses erros estão relacionados ao registro de leituras nas réguas, uma vez que essa técnica de obtenção de altitude do nível do zero das réguas é dependente da qualidade dos registros lidos e anotados pelos observadores hidrológicos. Na Tabela 5.2, com base na comparação entre os valores de altitude do zeros das réguas, obtidos por método cinemático e por método estático, duas considerações adicionais podem ainda ser feitas. A primeira aponta uma possível interpretação de que a mediana das diferenças entre os métodos fixo e cinemático representou, em média, melhor os valores de altitude do zero das réguas. Essa condição justifica-se em virtude de que, em função de sucessivas passagens, é possível encontrar erros espúrios, principalmente aqueles causados por registros inconsistentes de nível de água. A segunda consideração diz respeito ao fato de que se pode identificar, com base no levantamento realizado, as réguas com menores desvios, como é o caso de Óbidos, Tabatinga, Santarém e Manaus, localizadas em portos fluviais, com alta estabilidade de lance de réguas devido a obras de engenharia no local e com um maior rigor nas leituras, que são realizadas por profissionais que trabalham nesses portos.

Na Tabela 5.3, são apresentados os valores de altitude do zero das réguas, com denominação de “*zero mediana*”, obtidos apenas pela passagem do barco, não existindo, portanto, valores de ocupações fixas para validar essas informações. Os valores de altitude do zero das réguas linimétricas foram baseados na mediana das passagens do barco, definida, pelas análises anteriormente realizadas, como sendo uma estatística potencialmente mais adequada para produzir a estimativa da referência de zero. O número de passagens do barco (N) pela régua e o desvio médio dessas passagens pode indicar, como já mencionado, a qualidade do levantamento e, também, a qualidade dos registros de níveis de água nas réguas feitos pelo observador.

Tabela 5.3 Altitude do zeros das réguas de estações fluviométricas obtida apenas por passagem de antenas de receptores GNSS a bordo de barcos.

CÓDIGO HIDROWEB	NOME DA ESTAÇÃO	ZERO MEDIANA (em metros)	N	DIFF ZERO MÉDIA (em metros)	DESVIO (em metros)
15031000	BOM_SUCESSO	5,19	5	0,002	0,034
11500000	SANTO_ANTONIO_DO_ICA	41,53	11	-0,024	0,053
14480002	BARCELOS	15,01	8	0,013	0,071
13150003	COARI	14,79	12	-0,022	0,114
15490000	PROSPERIDADE	37,54	8	-0,002	0,114
15850000	NOVO_ARIPUANA	3,84	13	0,038	0,116
13150004	SANTA_LUZIA_BANANAL	12,97	3	-0,043	0,121
13990000	BERURI	5,64	30	0,163	0,463

Na análise da Figura 5.7, para a diferença entre valores obtidos do zero das réguas por métodos do ponto fixo e cinemático realizados no rio Madeira, quase a totalidade dos valores apresentaram a precisão esperada dos levantamentos cinemáticos, ou seja, menores do que cinco (5) centímetros, sendo, no entanto, encontrados valores fora da margem de erro tolerado.

Em um caso específico, por exemplo, para a medição realizada pelo perfil cinemático coletado no ano de 2009 na estação de Fazenda Vista Alegre, o levantamento cinemático apresentou um valor fora do esperado: cerca de 25 centímetros de diferença para o valor do ponto fixo. Uma vez analisadas as possíveis fontes de erros para essa diferença de medição, foi recuperada a informação, por meio de registros da campanha de campo, de que a régua, no dia da passagem do barco, estava caída, ou seja, com impossibilidade de se fazer a sua leitura. Porém o endereço eletrônico do banco de dados do HIDROWEB, para o período de passagem do barco, informava a cota de 12,39 metros. A partir desse caso, concluímos, portanto, que a cota que não foi possível de ser lida na passagem de barco, devido à queda do lance de régua, foi supostamente atribuída de maneira arbitrária e errônea pelo observador ou foi realizada uma tentativa, sem muito sucesso, de preenchimento de falhas por parte da operadora dessa estação.

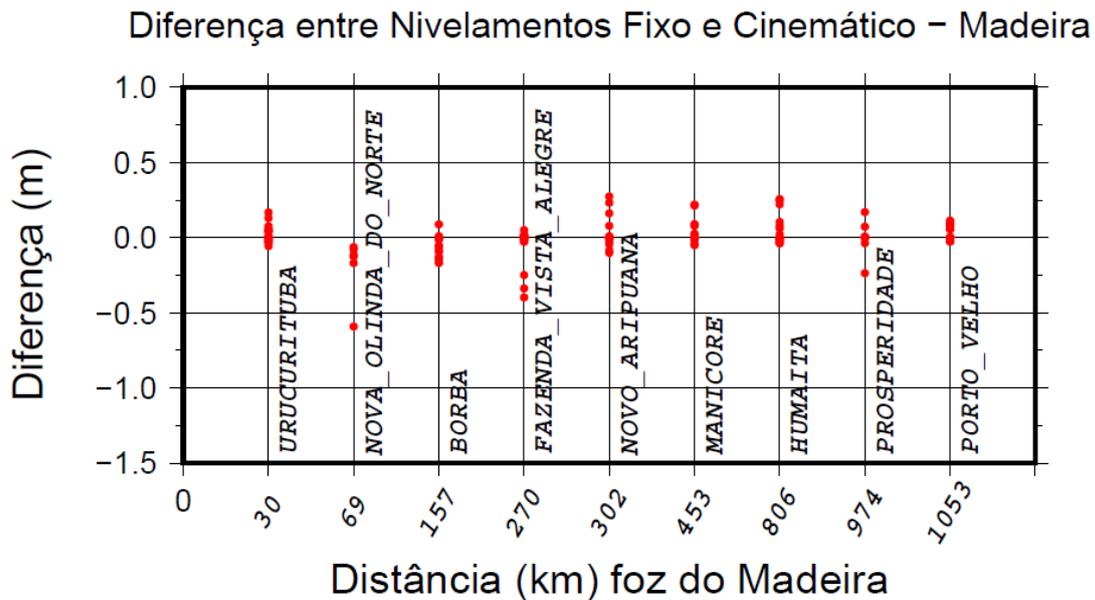


Figura 5.7 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Madeira.

Na sequência, na Figura 5.8, são apresentadas as diferenças entre os dados de altitude do zero de réguas fluviométricas obtidos mediante comparação dos dados GNSS processados de forma cinemática e por ocupação fixa de receptores GNSS das estações fluviométricas do rio Negro.

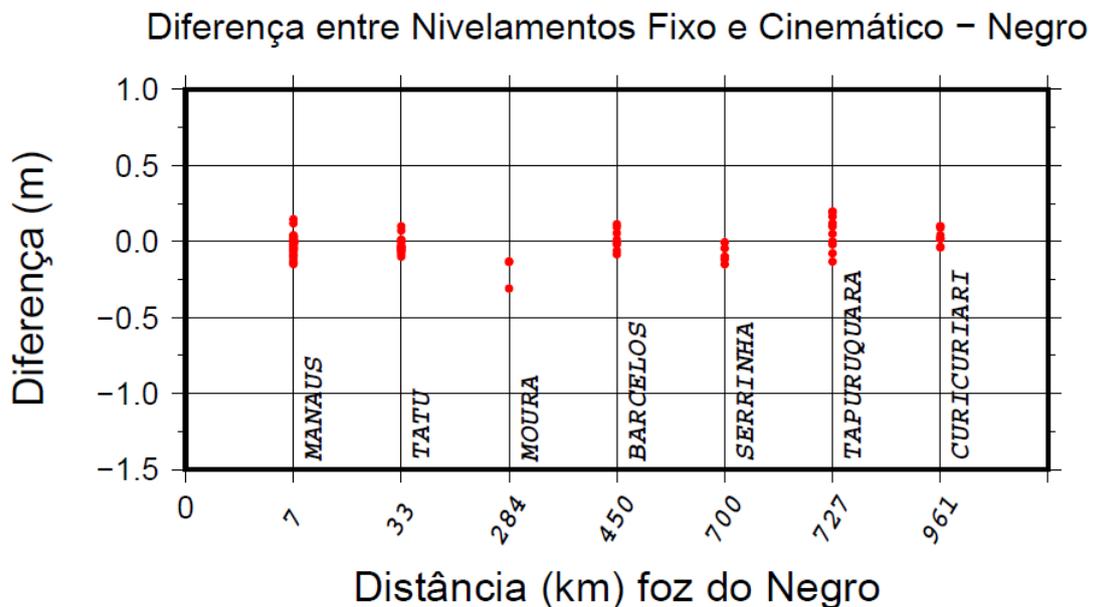


Figura 5.8 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Negro.

A Figura 5.9 apresenta as diferenças entre os resultados obtidos para a altitude do zero das réguas de forma cinemática e por ocupação fixa das estações fluviométricas do rio Solimões.

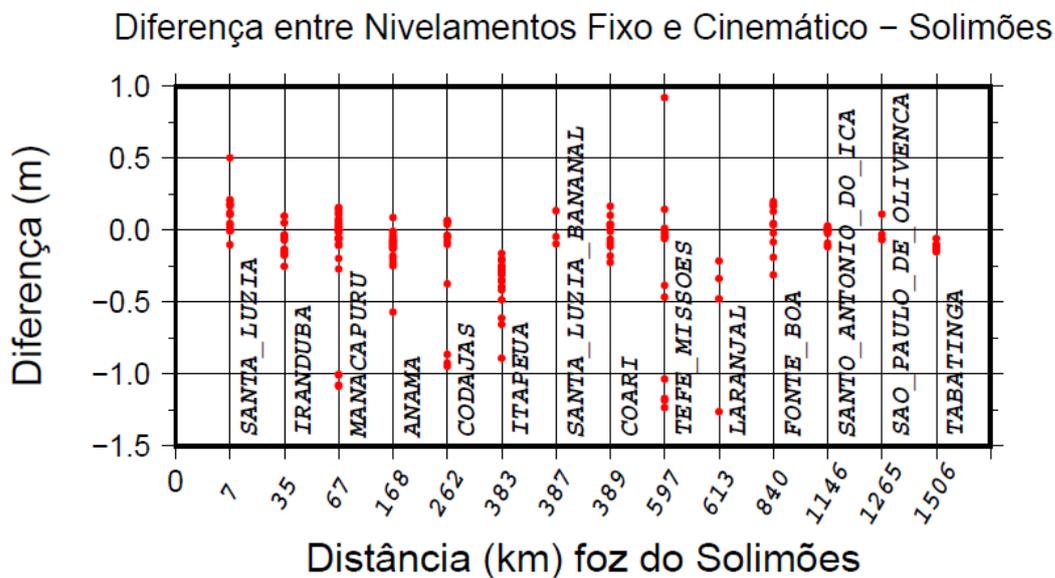


Figura 5.9 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Solimões.

A Figura 5.10, por sua vez, ilustra as diferenças comparativas para os resultados de altitude do zero das réguas definida pelos métodos cinemático e de ocupação fixa das estações fluviométricas do rio Amazonas.

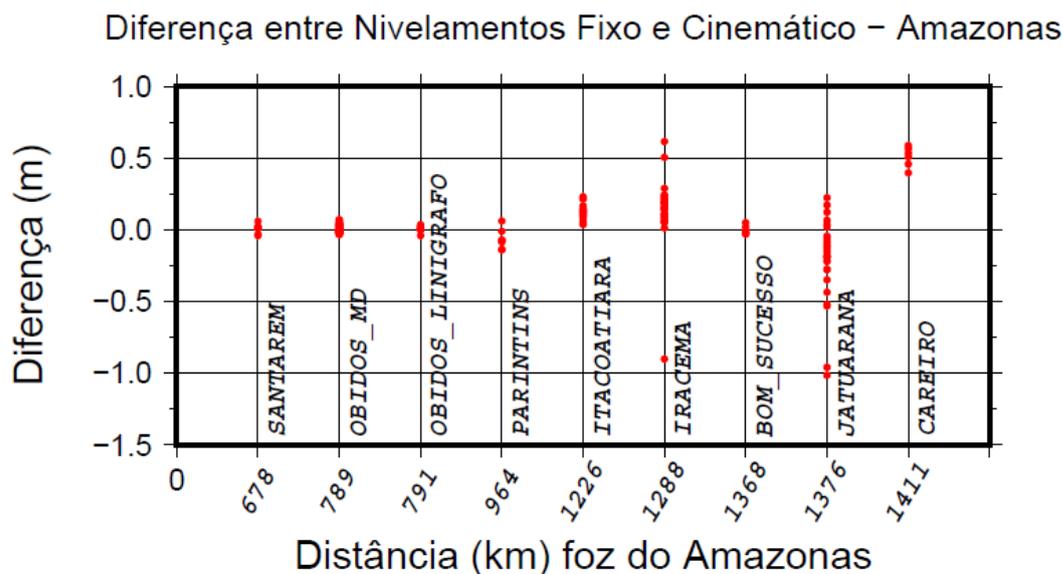


Figura 5.10 - Diferença entre valores obtidos por ponto fixo e cinemático nas diferentes passagens de barco para estações fluviométricas do rio Amazonas.

Quando se analisam conjuntamente os gráficos obtidos para os rios Madeira, Negro, Solimões e Amazonas (Figura 5.7 a Figura 5.10), pode-se observar que grande parte das diferenças entre os dois métodos de obtenção dos valores de altitude do nível zero de réguas encontram-se dentro precisão esperada. No entanto, foram encontrados novamente resultados não satisfatórios quando se pontuam diferenças entre os métodos fixo e cinemático.

Pode-se, neste ponto, reiterar o argumento de que se supõe a ocorrência de erros de leituras das réguas linimétricas ou preenchimento de falhas errôneas durante os períodos de observação, referentes à passagem do barco. Como exemplo da qualidade de dados fluviométricos obtidos em rios Amazônicos, foi realizada a comparação de duas estações fluviométricas (Figura 5.11). Foram selecionadas, na área de estudo, as duas estações que possuem a menor distância entre si, de forma que a variação da declividade da linha de água entre as estações e conseqüentemente diferença entre as leituras das réguas sejam mínimas. As estações escolhidas foram a estação do Careiro (código hidroweb 15040000) e a estação de Jatuarana (código hidroweb 15030000), ambas no rio Amazonas. Os diversos perfis cinemáticos, obtidos por receptores GPS, coletados durante a passagem entre essas estações, indicam que essas estações têm um desnível da linha de água sempre inferior a dois (2) centímetros.

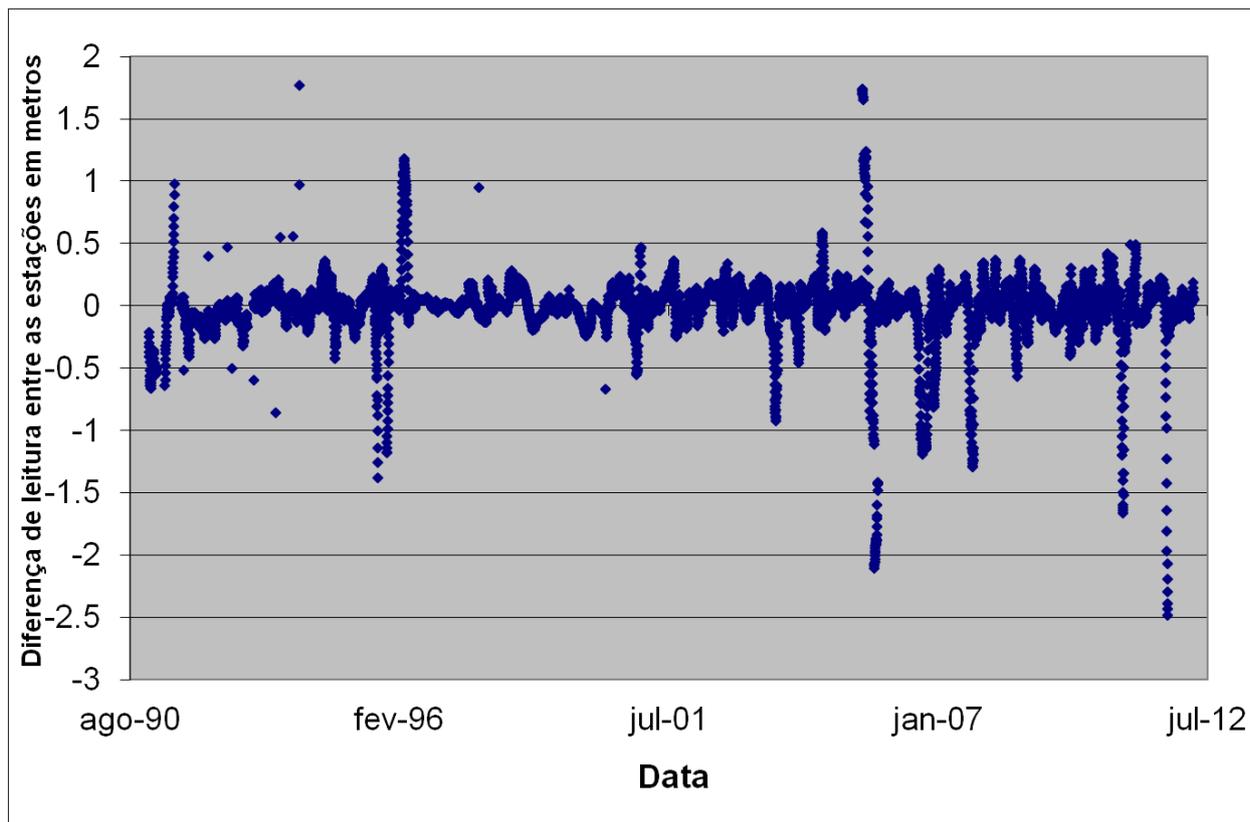


Figura 5.11 – Diferença entre os valores das leituras das réguas das estações de Jatuarana e Careiro com base no banco de dados HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA).

As diferenças significativas apresentadas entre leituras de réguas na Figura 5.11, que deveriam, em princípio, apresentar observações semelhantes, revelam um fato crítico quanto à operação e, conseqüentemente, quanto à qualidade de dados gerados por estações fluviométricas na região amazônica.

Em relação aos dados fluviométricos, normalmente, a comunidade científica estabelece que tais medições de nível de água representam a verdade de campo ou terrestre. Essas medições, usualmente, são utilizadas como entrada de modelos hidrodinâmicos e de modelos hidrológicos, seja de forma direta ou seja ainda de forma indireta, após a aplicação da curva-chave, que necessita, por sua vez, ser definida e calibrada, permitindo a transformação de nível em vazão.

Adicionalmente, a informação de nível de água é empregada na validação de dados de altimetria espacial em pesquisas, algumas delas já citadas na revisão bibliográfica do trabalho, em que se objetiva, sob certa medida, empregar as

informações de satélite em estudos hidrológicos que integrem informações de sensoriamento remoto e medições *in situ* para melhor compreensão e modelagem dos recursos hídricos, em quantidade e em qualidade, na escala de um bacia hidrográfica ou ainda na escala regional e global.

No caso do estudo aqui elaborado, as séries do banco de dados HIDROWEB foram utilizadas para validação de perfis cinemáticos quando não foi possível coletar e validar o dado de cota da estação fluviométrica durante a campanha. O exemplo dessa discrepância nas observações hidrológicas pode ser observado na Figura 5.12, que apresenta as passagens do barco em comparação com o nível de água na estação Tefé do rio Solimões. Nessa estação puderam-se observar diferenças significativas entre as altitudes do zero das réguas medidos nas passagens do barco, diferenças essas que são coincidentes com falhas nos registros de medição de nível de água.

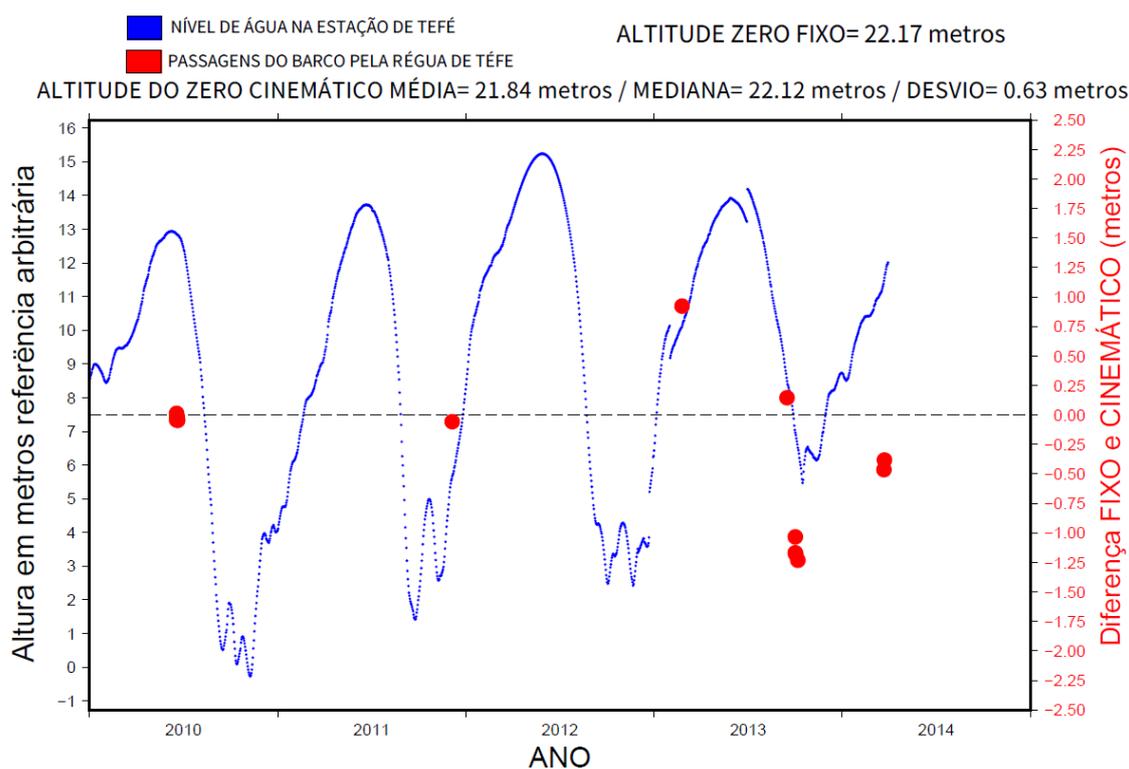


Figura 5.12 - Altitude (em metros) do zero da régua medido (pontos vermelhos) nas passagens do barco em Tefé e registros de níveis de água falhos que resultam em erros na obtenção da altitude do zero da régua.

Essas grandes diferenças entre os valores encontrados na obtenção da altitude do nível do zero das réguas, que são justificadas por observações hidrológicas errôneas de

nível de água realizadas em estações convencionais, possibilitam formular a questão que coloca em cheque estudos hidrológicos anteriores publicados fartamente na literatura nacional e mundial, em especial na bacia Amazônica, em que se deve ponderar criticamente até que ponto os dados fluviométricos tinham a qualidade e o rigor de coleta suficientes para validar dados obtidos por outras fontes, incluindo dados de sensoriamento remoto obtidos por plataformas satelitais e os resultados até o momento apresentados de modelagem hidráulico-hidrológica e atmosférica nessa região.

Esta tese sustenta que, talvez, possa ter chegado o momento da aplicação de dados geodésicos, nos moldes aqui proposto de forma pioneira, neste novo campo da hidrogeodésia, como ferramenta de suporte na execução de consistência e validação efetiva de dados hidrológicos em regiões onde o monitoramento hidrológico é complexo, como é o caso da bacia Amazônica.

Como ilustração, a Figura 5.13 ilustra uma situação comum encontrada nos rios amazônicos, a exemplo da instabilidade do solo e resultante consequência da falta da verticalidade dos segmentos de réguas, onde muitas de suas componentes, usualmente denominados de lances de régua, sofrem tombamentos durante a variação do ciclo hidrológico, fazendo com que, conseqüentemente, não seja possível realizar leituras de nível de água da forma mais precisa e adequada de forma contínua e consistente ao longo do tempo.



Figura 5.13 – Instabilidade dos lances de régua encontrados na bacia Amazônica.

5.1.1 Comparação da altitude do zero das réguas encontrados em outros estudos

No estudo apresentado por KOSUTH *et al.* (2006), que é referente à tese de CAMPOS (2004), realizou-se a obtenção da altitude do zero de algumas réguas fluviométricas na bacia Amazônica. Os valores obtidos de altitude do zero de réguas linimétricas, nesta tese, foram comparados com os valores encontrados por KOSUTH *et al.* (2006), de forma a avaliar a diferença entre os procedimentos de obtenção de altitude do zero das réguas adotados em ambos os estudos. Na Tabela 5.4, são discriminadas essas diferenças, apresentando os valores de altitude elipsoidal dentro de um mesmo sistema geodésico, no caso o WGS84, ou seja, não estão referenciados ao geóide; as unidades de medida das altitudes bem como as diferenças encontradas estão apresentadas em metros.

Tabela 5.4 - Diferenças de altitude do zero de réguas linimétricas encontradas entre o presente estudo e o estudo de KOSUTH *et al.* (2006).

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	CÓDIGO HIDROWEB	RIO	ZERO Kosuth <i>et al.</i> (2006) (em metros)	ZERO OBITDO (em metros)	DIFERENÇA (em metros)
ÓBIDOS	17050000	AMAZONAS	-18,62	-18,14	0,48
PARINTIS	16350002	AMAZONAS	-10,8	-10,67	0,13
SANTARÉM	17900000	AMAZONAS	-18,74	-18,58	0,16
BORBA	15900000	MADEIRA	-6,74	-6,55	0,19
HUMAITA	15630000	MADEIRA	31,36	31,49	0,13
MANICORÉ	15700000	MADEIRA	2,56	2,5	-0,06
NOVA OLINDA DO NORTE	15940000	MADEIRA	-9,78	-9,65	0,13
PORTO VELHO	15400000	MADEIRA	54,75	54,79	0,04
URUCURITUBA	15960000	MADEIRA	-14,24	-14,25	-0,01
VISTA ALEGRE	15860000	MADEIRA	-4,65	-4,44	0,21
PORTO DE MANAUS	14990000	NEGRO	-18,55	-18,72	-0,17
FUNTE BOA	12351000	SOLIMÕES	27,81	28,17	0,36
ITAPEUA	13150000	SOLIMÕES	8,32	7,72	-0,6
SAO PAULO	11400000	SOLIMÕES	59,38	59,64	0,26
TABATINGA	10100000	SOLIMÕES	74,26	74,51	0,25
TEFE	12900001	SOLIMÕES	26,96	22,95	-4,01

As diferentes medidas encontradas podem ser justificadas pelo fato do estudo de KOSUTH *et al.* (2006) não utilizar a correção de fenômenos de cargas e, principalmente, pelo uso de técnicas de processamento clássicas, como, por exemplo, a dupla-diferença de fases. Conforme anteriormente apresentado, a técnica de dupla diferença de fases tem sua precisão limitada com acréscimo do comprimento da linha de base. No ano 2006, data do estudo realizado, havia menor densidade de estações permanentes instaladas na bacia Amazônica, e, portanto, foram utilizadas linhas de base maiores que 1000 quilômetros. Com respeito ao código computacional de processamento de dados GNSS utilizado, pôde-se observar, na descrição realizada por CAMPOS (2009), que esse código computacional não era adequado para processamento de grandes linhas de bases devido à ausência de correção de vários efeitos geofísicos e de observação, fato que prejudicou a precisão das soluções obtidas. Em relação às diferenças encontradas, acrescentam-se, ainda, possíveis erros das coordenadas de

origem das estações de referência utilizadas no método de dupla diferença de fase, que são propagados na direção da estação para a qual se deseja obter as coordenadas.

Entre as hipóteses para a diferença entre os valores de altitudes do zero das régua de presente estudo e aqueles obtidos por KOSUTH *et al.* (2006), não relacionadas a estratégias de processamento de dados, pode-se acrescentar questões referentes a possíveis deslocamentos ocorridos nas referências de nível das estações fluviométricas. Devido à sua instabilidade, é provável que, na diferença temporal estimada de pelo menos 10 anos entre os levantamentos realizados, tenham ocorrido alguns deslocamentos das RRNN, considerando-se a instabilidade do solo. O caso da estação de Tefé, cuja diferença é cerca de 4 metros de diferença, aponta para uma mudança de referência e local da estação. Essa condição ressalta a importância de que a verificação da altitude do zero das régua seja realizada, de forma periódica, a partir de receptores GNSS, se possível em cada campanha de manutenção. Segundo esse propósito, a estratégia de obtenção de altitudes usando barcos pode ajudar a simplificar o processo de verificação da altitude do zero da régua de forma a garantir a estabilidade das RRNN.

Nesse contexto, é importante salientar que as técnicas utilizadas por KOSUTH *et al.* (2006) representavam o estado da arte do processamento GPS na época da execução do estudo supracitado. Com o aprimoramento das técnicas de processamento, os valores obtidos, nesta pesquisa, chegaram a um nível de precisão superior ao estudo de KOSUTH *et al.* (2006), sendo constatado o aumento da acurácia do processamento na obtenção de altitudes elipsoidais com erros da ordem de dois (2) centímetros para os valores obtidos, conforme o resultado apresentado no Capítulo 3 desta tese. Cabe salientar, também, que dados coletados e processados em épocas anteriores, em situações que limitaram a precisão do processamento, como é o caso de linhas de base de grande extensão, podem ser reprocessados com técnicas atuais de forma a melhorar a precisão dos resultados.

5.1.2 Altitude do zero da régua em função dos efeitos de carga hidrológica

No trabalho realizado por MOREIRA (2010), foi evidenciada a forte correlação entre o deslocamento vertical da crosta terrestre e a variação do nível do curso de água, por exemplo, na localidade da estação fluviométrica do Porto de Manaus, no rio Negro. Essa forte correlação possibilitou apresentar, no estudo supracitado, uma equação de regressão, representando a variação da coordenada elipsoidal do zero da régua em

função da variação do nível de água. A partir dessa equação, foi possível obter o nível de água da régua linimétrica ajustado de acordo com a carga hidrológica. Viabilizou-se, assim, uma melhor comparação entre dados de réguas fluviométricas e dados de altimetria espacial, fazendo com que as comparações entre os dados de altimetria e de régua sofram, por igual, os efeitos de carga hidrológica, tornando possível eliminar as inconsistências obtidas nessa comparação.

A seguir, como evidência dessa relação, serão apresentados dois novos casos de correlações entre dados fluviométricos obtidos por satélites altímetros e por réguas linimétricas, incluindo dados de deformação da crosta obtidos por estações GPS e por dados do satélite GRACE. Na Figura 5.14, é possível observar a variação vertical da estação GNSS de Urucurituba, a deformação crustal dada pela série GRACE, a variação da cota fluviométrica obtida pelo satélite altímetro JASON-2, a variação da régua linimétrica e as correspondentes correlações entre essas técnicas (Tabela 5.5).

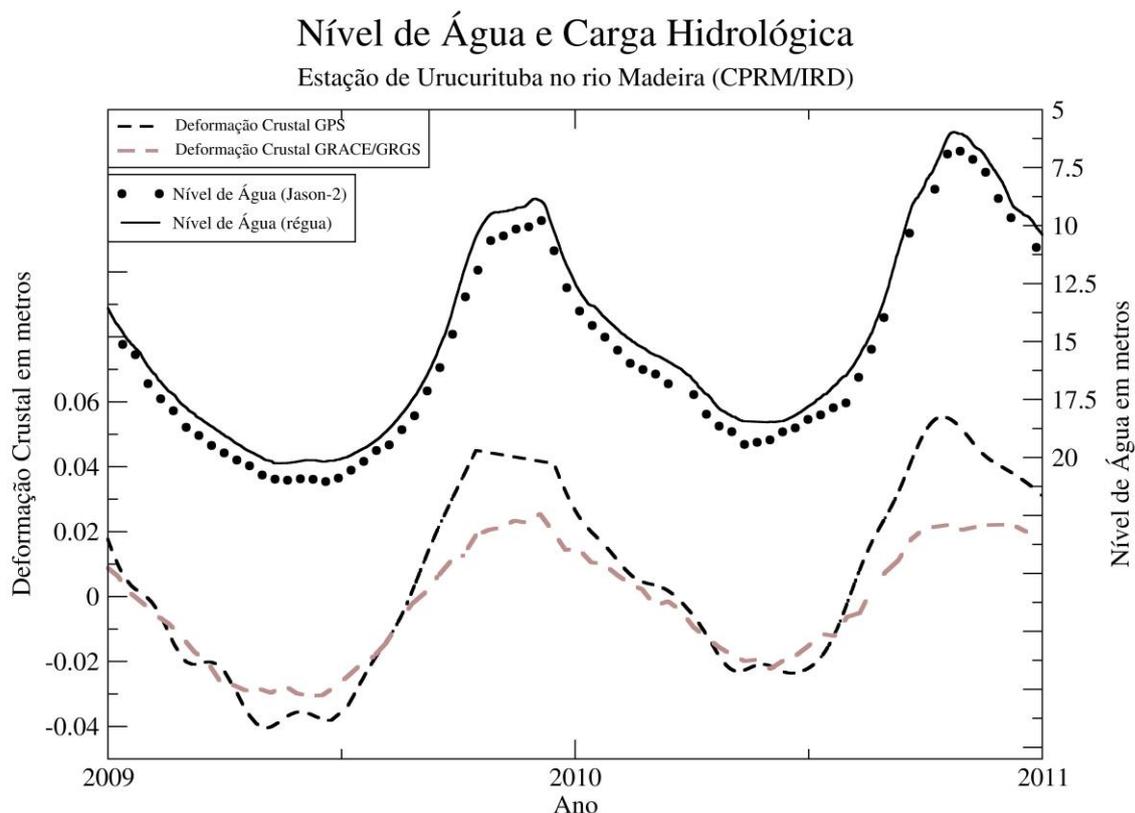


Figura 5.14 - Série de dados geodésicos e da régua linimétrica em Urucurituba – eixo à esquerda: deformação radial crustal (em metros) (GPS e GRACE); eixo à direita: nível de água (em metros) (régua e altímetro JASON-2).

Tabela 5.5 - Correlação entre dados geodésicos e régua linimétrica em Urucurituba.

URUCURITUBA	Altimetria Espacial	Régua	GPS	Grace
Altimetria Espacial		0,999	-0,969	-0,963
Régua	0,999		-0,973	-0,964
GPS	-0,969	-0,973		0,984
Grace	-0,963	-0,964	0,984	

Essa mesma comparação, envolvendo a variação vertical da estação GNSS de Porto Velho, a série GRACE, a cota fluviométrica obtida pelo satélite altímetro JASON-2 e a régua linimétrica, pode ser vista na Figura 5.15. Correspondentes correlações entre essas diferentes bases de dados são destacadas na Tabela 5.6.

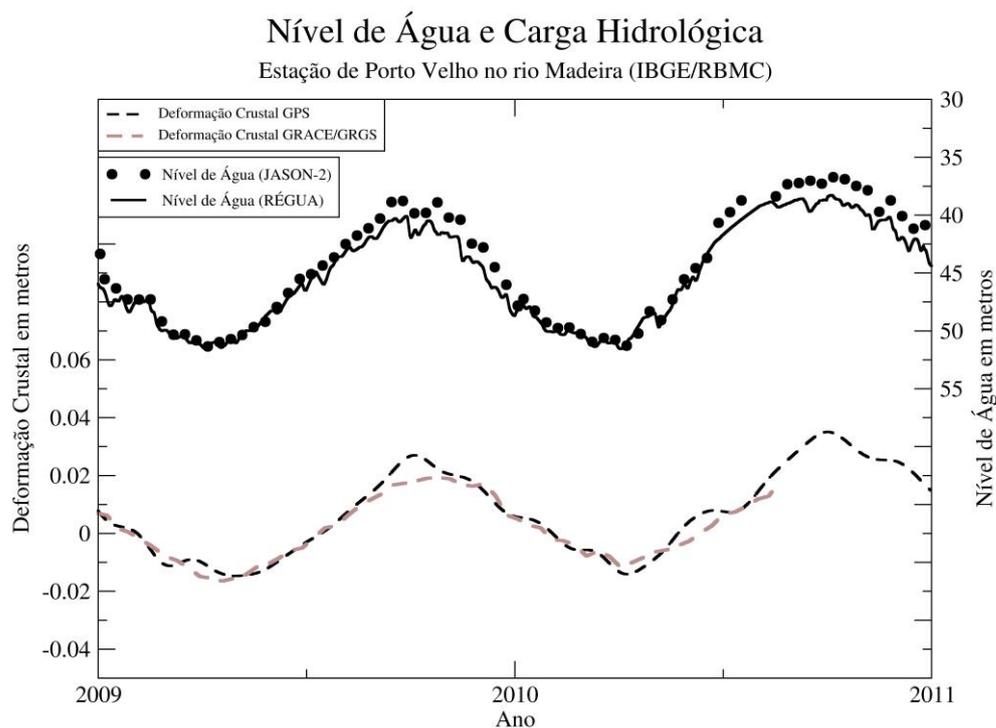


Figura 5.15 - Série de dados geodésicos e da régua linimétrica em Porto Velho -. eixo à esquerda : deformação radial crustal (em metros) (GPS e GRACE); eixo à direita: nível de água (em metros) (régua e altímetro JASON-2).

Tabela 5.6 - Correlação entre dados geodésicos e régua linimétrica em Porto Velho.

PORTO VELHO	Altimetria Espacial	Estação Fluviométrica	GPS	Grace
Altimetria Espacial		0,985	- 0,937	- 0,938
Estação Fluviométrica	0,985		- 0,909	- 0,905
GPS	-0,937	-0,909		0,975
Grace	-0,938	-0,905	0,975	

Com suporte nas boas correlações anteriormente apresentadas entre séries de dados do satélite GRACE e dados de nível de água, que também foram apresentados nos trabalhos de ALMEIDA FILHO (2009) e MOREIRA (2010) e nos dois exemplos apresentados, nesta tese, para as estações de Porto Velho e Urucurituba, propõe-se aqui uma equação com valor dinâmico para a altitude do zero de todas as estações fluviométricas apresentadas neste estudo. Para o alcance desse propósito, foram extraídas as séries do GRACE (GRGS), as quais tiveram seus valores interpolados para os locais de estações fluviométricas. As séries do GRACE de 2003-2014 e séries de níveis de água nesse mesmo período tiveram seus valores comparados, sendo obtidas, então, as equações de regressão entre os valores de nível de água e valores de deformação crustal.

A partir dessa regressão, pode-se obter a equação que define a altitude do zero da régua das estações utilizadas neste trabalho. Essa equação pode ser definida pela expressão:

$$H(0,t) = A * x(t) + H_0 \quad (4.2)$$

sendo os termos que compõem essa equação designados por:

$H(0,t)$ - altitude do zero da régua no modelo do geopotencial EMG08 (em metros) da estação fluviométrica selecionada na época do tempo t ;

A – coeficiente angular dado pela equação de regressão;

x - nível de água na estação no tempo t , segundo o banco de dados HIDROWEB (em metros);

H_0 - altitude base do zero da régua da estação a calcular.

Na Tabela 5.7, são apresentadas as equações de altitude do zero das réguas fluviométricas com valores dinâmicos em relação à deformação da crosta. Essa informação pode ser localizada no campo “*EQUAÇÃO ZERO*”, no qual o único valor variável no termo de obtenção do zero dinâmico para qualquer época é exatamente o nível de água da estação na época desejada, representado pelo valor “ x ”. O campo “*CORREL*” representa o coeficiente de correlação linear da regressão entre os dados de deformação crustal do GRACE (GRGS) e de níveis de água nas réguas; o campo “*DESV*” representa o desvio entre os dados observados e a reta de regressão estatística, o campo “*ZERO*” apresenta o valor do zero estático da régua definido pelos experimentos anteriormente apresentados neste estudo; Complementarmente, o campo “*AMP*” representa a amplitude máxima (em metros) do deslocamento da crosta encontrada em cada estação fluviométrica, amplitude essa que foi detectada a partir das séries do GRACE de 2010-2014. A partir do campo “*AMP*” (amplitude), pode-se definir o impacto da aplicação da equação dinâmica, condição que possibilita observar, em quais estações, a utilização da equação pode agregar melhoria considerável de precisão na comparação entre dados fluviométricos e dados geodésicos, a exemplo da tecnologia de altimetria por satélites.

Tabela 5.7 - Proposta de valores dinâmicos para a altitude do zero das estações fluviométricas

CÓDIGO	ESTAÇÃO	CORREL	DESV(m)	ZERO (m)	EQUAÇÃO ZERO (m)	AMP(m)
14201000	SANTA_LUZIA	-0,97	0,004	1,47	-0,0044x+1,5410	0,07
15040000	CAREIRO	-0,96	0,004	4,77	-0,0043x+4,8254	0,07
15042200	IRACEMA	-0,97	0,004	1,83	-0,0047x+1,8928	0,07
15960000	URUCURITUBA	-0,97	0,003	-1,15	-0,0049x+-1,0690	0,07
15030000	JATUARANA	-0,96	0,004	3,11	-0,0046x+3,1755	0,07
15031000	BOM_SUCESSO	-0,99	0,003	5,19	-0,0042x+5,2398	0,07
14100000	MANACAPURU	-0,95	0,004	4,31	-0,0043x+4,3769	0,07
14101000	IRANDUBA	-0,99	0,002	3,49	-0,0052x+3,5658	0,07
14990000	MANAUS	-0,96	0,004	-7	-0,0043x+-6,8916	0,07
13990000	BERURI	-0,96	0,004	5,64	-0,0043x+5,7130	0,07
16030000	ITACOATIARA	-0,91	0,005	3,76	-0,0038x+3,8325	0,07
14050000	ANAMA	-0,96	0,004	9,02	-0,0041x+9,0745	0,07
14911000	TATU	-0,96	0,004	-7,22	-0,0043x+-7,1150	0,07
15940000	NOVA_OLINDA_DO_NORTE	-0,95	0,004	0,92	-0,0052x+1,0028	0,07
13155000	CODAJAS	-0,95	0,004	11,58	-0,0042x+11,6347	0,07
13980000	PARICATUBA	-0,97	0,003	6,73	-0,0040x+6,7969	0,07
15900000	BORBA	-0,95	0,004	1,71	-0,0041x+1,7825	0,07
13150000	ITAPEUA	-0,95	0,004	14,74	-0,0042x+14,7945	0,06
13150004	SANTA_LUZIA_BANANAL	-0,96	0,004	12,97	-0,0033x+13,0173	0,06
13150003	COARI	-0,94	0,004	14,79	-0,0039x+14,8408	0,06
16350002	PARINTINS	-0,97	0,003	5,45	-0,0063x+5,4860	0,06
15860000	FAZENDA_VISTA_ALEGRE	-0,95	0,004	3,28	-0,0034x+3,3422	0,06
15850000	NOVO_ARIPUANA	-0,95	0,004	3,84	-0,0030x+3,8978	0,06
16100000	CACHOEIRA_MORENA	-0,16	0,007	12,53	-0,0025x+12,5543	0,06
17060000	VILA_CURUAI	-0,97	0,003	-0,02	-0,0069x+0,0367	0,06
17050002	OBIDOS_MD	-0,97	0,003	3,58	-0,0069x+3,6174	0,06
17050001	OBIDOS_LINIGRAFO	-0,97	0,003	3,58	-0,0069x+3,6177	0,06
12900001	TEFE_MISSOES	-0,93	0,003	22,17	-0,0037x+22,2101	0,06
16080000	LAGO_BALBINA	-0,19	0,007	-2,46	-0,0019x+-2,3975	0,06
17900000	SANTAREM	-0,97	0,003	1,92	-0,0075x+1,9602	0,06
12873000	LARANJAL	-0,94	0,003	22,71	-0,0039x+22,7511	0,06
15700000	MANICORE	-0,94	0,004	6,81	-0,0029x+6,8719	0,06
14876000	SERINGALZINHO	-0,96	0,003	4,8	-0,0038x+4,8548	0,05
14840000	MOURA	-0,97	0,003	9,26	-0,0035x+9,2974	0,05
12351000	FONTE_BOA	-0,91	0,003	22,88	-0,0034x+22,9423	0,05
15630000	HUMAITA	-0,95	0,004	24,26	-0,0025x+24,3063	0,05
14480002	BARCELOS	-0,97	0,002	15,01	-0,0048x+15,0399	0,04

continuação Tabela 5.7 - Proposta de valores dinâmicos para a altitude do zero das estações fluviométricas

CÓDIGO	ESTAÇÃO	CORREL	DESV(m)	ZERO (m)	EQUAÇÃO ZERO (m)	AMP(m)
15490000	PROSPERIDADE	-0,95	0,003	37,54	-0,0023x+37,5677	0,04
15400000	PORTO_VELHO	-0,94	0,003	42,73	-0,0022x+42,7554	0,04
11500000	SANTO_ANTONIO_DO_ICA	-0,87	0,003	41,53	-0,0026x+41,5588	0,04
11400000	SAO_PAULO_DE_OLIVENCA	-0,89	0,003	45,12	-0,0024x+45,1474	0,04
14845000	FAZENDA_SAO_JOSE	-0,97	0,002	49,54	-0,0051x+49,5631	0,03
14420000	SERRINHA	-0,94	0,002	22,11	-0,0044x+22,1463	0,03
14400000	TAPURUQUARA	-0,94	0,002	25,21	-0,0041x+25,2339	0,03
14428000	VILA_CONCEICAO	-0,9	0,002	26,14	-0,0048x+26,1868	0,03
10100000	TABATINGA	-0,89	0,003	56,4	-0,0020x+56,4198	0,03
14526000	BOMFIM	-0,95	0,002	71,07	-0,0024x+71,0851	0,03
14710000	CARACARAI	-0,96	0,002	36,51	-0,0028x+36,5225	0,03
14690000	MUCAJAI	-0,96	0,002	45,6	-0,0036x+45,6422	0,03
14527000	PONTE_DO_TACUTU	-0,92	0,003	65,98	-0,0022x+65,9959	0,03
14620000	BOA_VISTA	-0,95	0,002	56,18	-0,0031x+56,1923	0,03
14529000	FAZENDA_NOVO_DESTINO	-0,83	0,003	74,48	-0,0021x+74,4903	0,03
14330000	CURICURIARI	-0,94	0,002	30,8	-0,0028x+30,8319	0,03
14515000	FAZENDA_PASSARAO	-0,95	0,002	58,96	-0,0033x+58,9883	0,03
14680001	FE_ESPERANCA	-0,93	0,002	70,6	-0,0055x+70,6209	0,03
14320001	SAO_GABRIEL	-0,92	0,002	43,71	-0,0034x+43,7415	0,03
14650000	POSTO_FUNAI	-0,87	0,002	160,23	-0,0063x+160,2655	0,03
14495000	FAZENDA_CAJUPIRANGA	-0,94	0,002	67,5	-0,0044x+67,5308	0,03
14489000	MARACA	-0,89	0,002	76,99	-0,0034x+77,0113	0,02
14550000	MALOCA_DO_CONTAO	-0,79	0,003	99,18	-0,0026x+99,1898	0,02
14530000	VILA_SURUMU	-0,77	0,003	112,99	-0,0034x+113,0054	0,02
14110000	CUCUI	-0,96	0,001	57,46	-0,0020x+57,4974	0,02
14540000	BANDEIRA_BRANCA	-0,8	0,003	626,31	-0,0022x+626,3188	0,02

Na maioria das estações foram encontradas uma forte correlação dos dados de níveis de água em comparação com dados da deformação crustal derivadas de dados do satélite GRACE. Essas correlações estão de acordo com os estudos apresentados por MOREIRA (2010) e ALMEIDA FILHO (2009). Algumas estações apresentaram correlações baixas, a exemplo da estação CACHOEIRA MORENA, fato dessa estações ter seus níveis controlados artificialmente por barragens em reservatórios.

5.2 Perfis longitudinais dos rios Amazônicos

A obtenção de altitudes do zero das réguas linimétricas com relação a uma mesma referência altimétrica possibilita que os dados fluviométricos coletados por essas estações sejam analisados de forma conjunta, o que gera as condições necessárias para estimar o perfil longitudinal dos rios caracterizados, sendo esses limitados, em sua resolução espacial, pela distância entre as estações. A seguir, serão apresentados perfis dos rios amazônicos, os quais tiveram réguas obtidas a altitude do zero de suas medições. Esses perfis foram construídos a partir das médias mensais de dados fluviométricos no período 2001-2009, com o objetivo de apresentar a variação de nível de água nas diversas épocas do ano e nos trechos monitorados dos principais rios amazônicos. As Figuras 5.16 a 5.18 apresentam os perfis dos rios Madeira, Solimões e Negro. Nesses perfis, adicionou-se a parte da confluência com o rio Amazonas, visando mostrar a variação do nível de água no encontro entre esses rios.

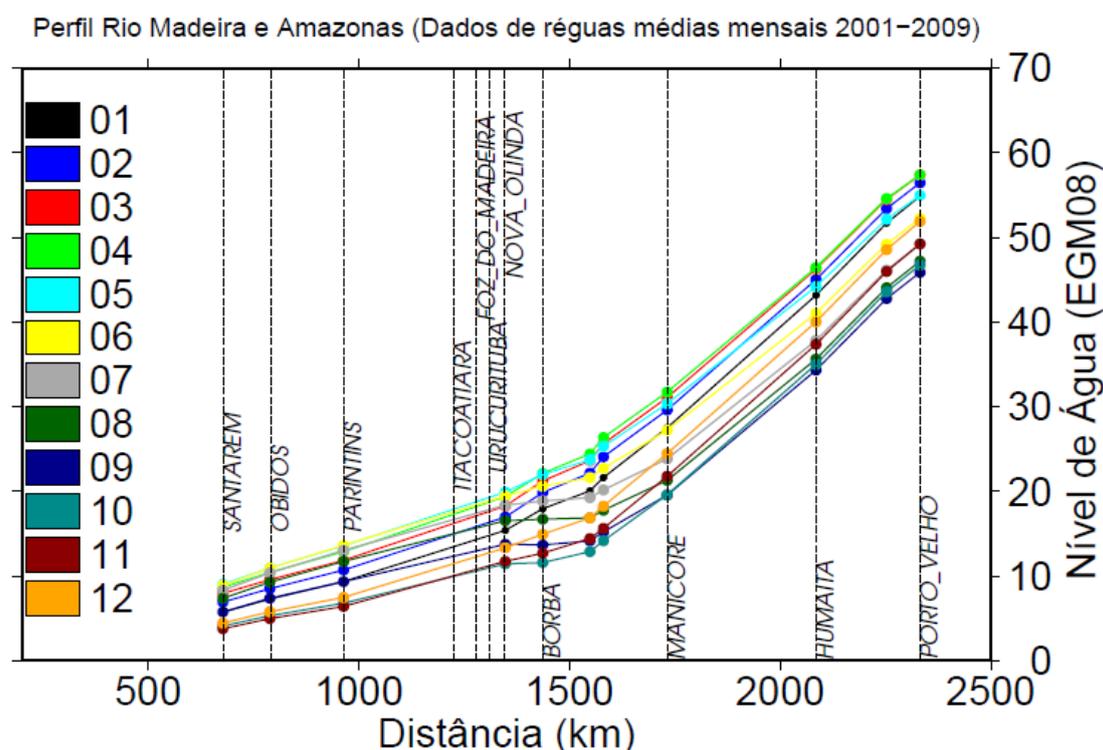


Figura 5.16 - Perfil longitudinal dos rios Madeira e Amazonas a partir de dados médios mensais (2001-2009) de nível de água das réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros).

Perfil Rio Solimões e Amazonas (Dados de réguas médias mensais 2001–2009)

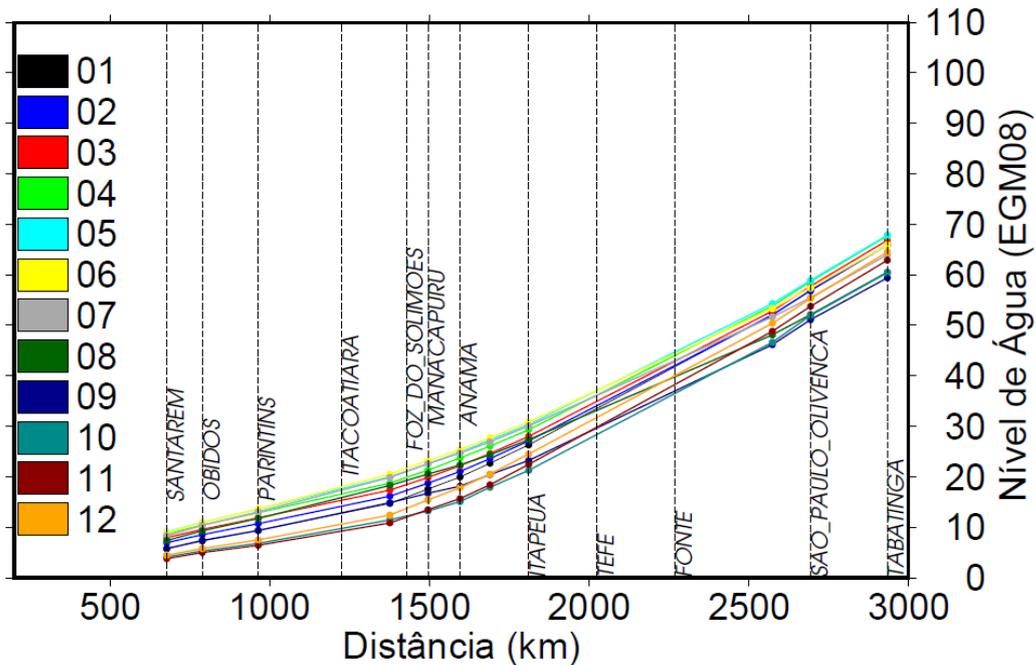


Figura 5.17 - Perfil longitudinal dos rios Solimões e Amazonas a partir de dados médios mensais (2001-2009) de nível de água de réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros).

Perfil Rio Negro e Amazonas (Dados de réguas médias mensais 2001–2009)

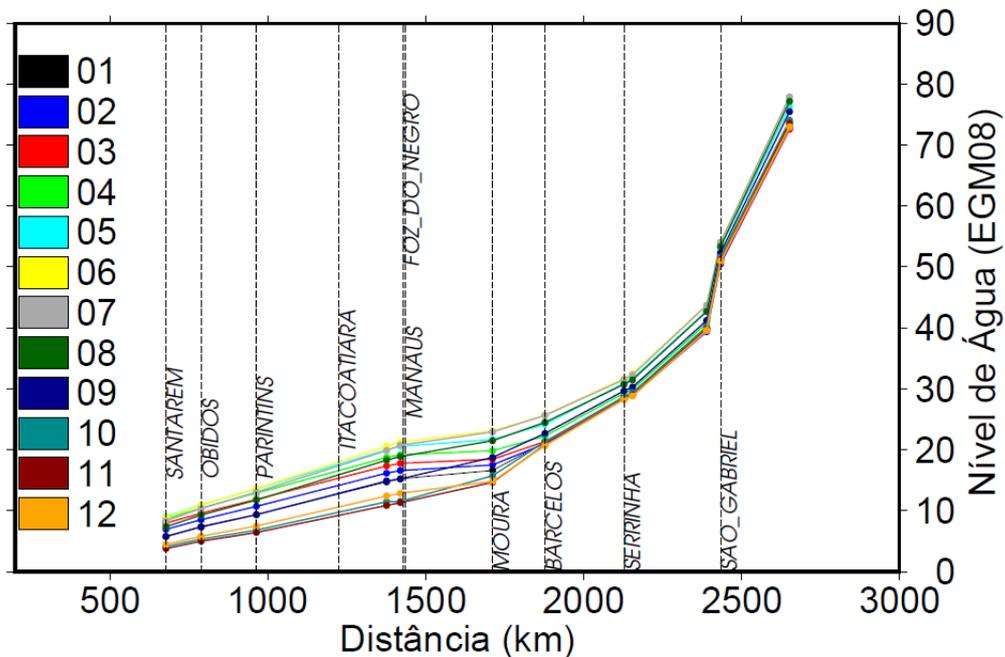


Figura 5.18 - Perfil longitudinal dos rios Negro e Amazonas a partir de dados médios mensais (2001-2009) de nível de água de réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros).

A partir dos perfis longitudinais, podem, também, serem extraídos os perfis de declividade dos rios amazônicos. A declividade é um importante parâmetro na modelagem hidrodinâmica e na propagação de níveis de cursos de água nos trechos locais de monitoramento, pois esse parâmetro influencia diretamente na velocidade do escoamento da água na calha do rio e conseqüentemente no tempo de propagação do escoamento. Nas Figuras 4.20 a 4.22, são apresentadas as declividades obtidas (em cm/km) a partir de dados de nível de água das réguas fluviométricas referenciadas ao geóide pelo EGM08 (metros).

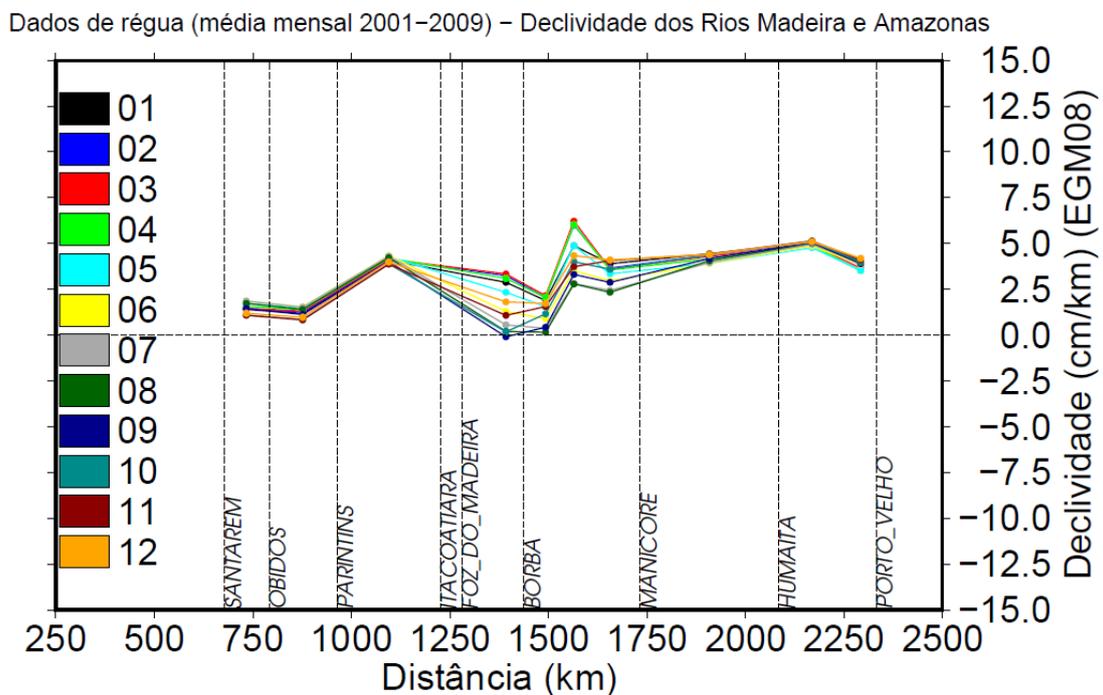


Figura 5.19 - Perfil de declividades da linha de água dos rios Madeira e Amazonas obtidos a partir de dados das diferenças de altitude dos níveis de água e distância de réguas (2001-2009).

Dados de régua (média mensal 2001–2009) – Declividade dos Rios Solimões e Amazonas

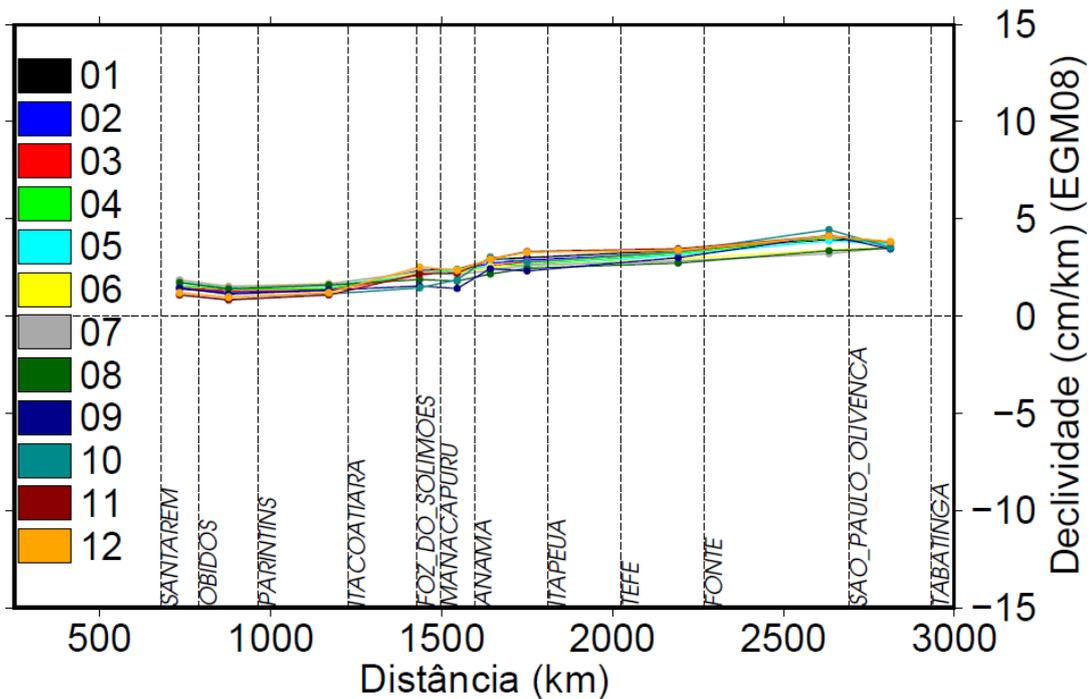


Figura 5.20 - Perfil de declividades da linha de água dos rios Solimões e Amazonas obtidos a partir de dados das diferenças de altitude dos níveis de água e distância de régua (2001-2009).

Dados de régua (média mensal 2001–2009) – Declividade dos Rios Negro e Amazonas

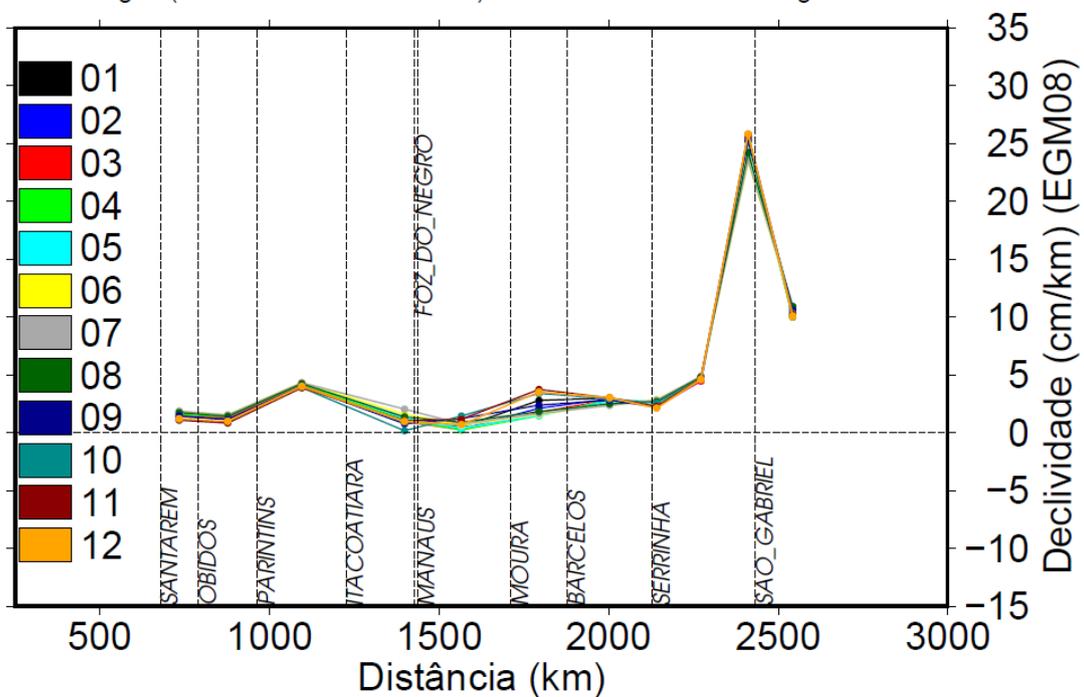


Figura 5.21 - Perfil de declividades de linha de água dos rios Negro e Amazonas obtidos a partir de dados das diferenças de altitude dos níveis de água e distância de régua (2001-2009).

Para os perfis de declividade e de altitude, foram detectados valores anômalos que envolvem a estação de Itacoatiara, sendo essas anomalias associadas diretamente à análise das estações fluviométricas de Urucurituba, a montante de Itacoatiara, e Parintins, a jusante. A partir da análise da estação de Itacoatiara e uma posterior visita de campo, foi detectado que ocorreu, nessa estação, uma mudança de referencial altimétrico arbitrário no mês de outubro de 2010, consoante Figura 5.22. A obtenção de altitude do zero dessa estação, a partir do uso de receptores GPS, foi realizado em abril do ano seguinte (2011), fato que produziu a situação de que o valor do zero da régua obtido não permitiu a utilização de séries de nível de água dessa estação em datas anteriores a outubro de 2010, quando houve uma mudança de referencial. A mudança de referencial de uma estação ocorre em determinados momentos, quando se faz necessário deslocar a estação por questões de mudança de observador, destruição da estação por evento extremo ou necessidade de ocupação da estação por alguma obra de construção civil. Essa iniciativa exige o máximo de rigor possível na transferência, pois qualquer erro cometido propagar-se-á como um erro sistemático que poderá ser erroneamente interpretado como mudança do regime hidrológico local.

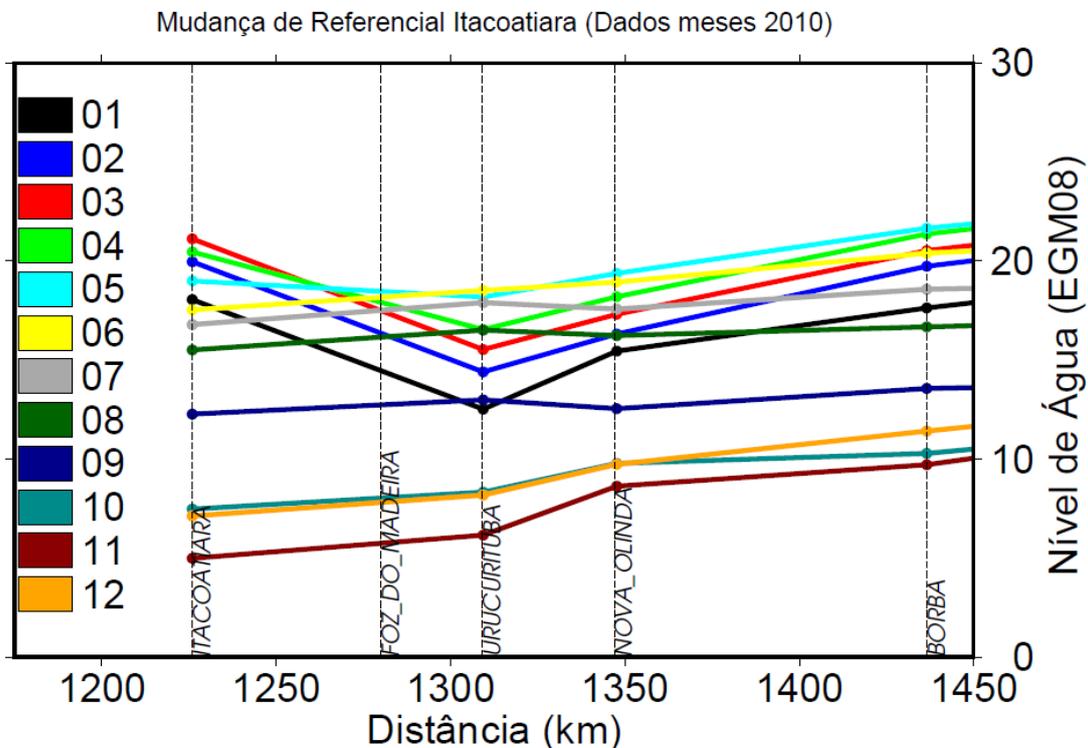


Figura 5.22 - Problema da mudança de referencial arbitrário nos dados da estação de Itacoatiara.

O valor do deslocamento nas séries de Itacoatiara, em função da conseqüente mudança de referencial, só pôde ser percebido devido ao ajuste grosseiro na compatibilização de medidas quando da mudança entre as duas referências. Mesmo após a detecção do erro, o ajuste entre as séries não é uma tarefa simples. No caso da estação de Itacoatiara, existe uma grande ausência de observações na série de dados durante o período de mudança de referencial, ou seja, outubro de 2010, fato que, provavelmente, provocou a mudança do local da estação e que prejudica a tentativa de integração dos referenciais apenas baseado nas leituras de réguas. Esse evento ressalta a importância de referenciar globalmente as estações a partir de receptores GPS e da constante verificação dos valores dessa referência, medidas essas que possibilitam impedir erros em caso de necessidade da mudança de marcos de referência e que ainda garantem a sua manutenção como forma de prevenção de fenômenos físicos que possam deslocar ou destruir a referência ao longo do tempo.

Através dos receptores GNSS instalados a bordo de barcos, que permitiram obter a altitude do zero das réguas em modo cinemático, procedimento anteriormente apresentado, também foi possível a aquisição de informações de variação da altitude da linha de água entre as diversas estações fluviométricas, ao longo dos diversos trechos de rios navegados, durante as dezesseis (16) campanhas de campo utilizadas neste estudo, que foram realizadas nos rios amazônicos.

Algumas questões são fundamentais para que os dados coletados e processados, conforme a metodologia delineada no Capítulo 3, pudessem ser convertidos para perfis longitudinais dos rios da bacia Amazônica. Nessas questões, pode-se citar:

- a estimativa entre a altura de antena do barco e o nível de água; a variação dessa altura no tempo, devido à perda e ganho de massa e resultante alteração no calado do barco, deve ser considerada;
- a variação de nível dos cursos de água durante a realização da cada campanha, pois cada campanha tem, em média, a duração de 10 dias; durante a sua realização, o rio pode variar até mais de 1 metro para um mesmo ponto, o que torna necessário corrigir as variações de nível, baseando-se em leituras de réguas das estações observadas para que o perfil longitudinal obtido tenha sua representação baseada em uma única época; sendo assim, cada ponto de nível de superfície de água obtido

pelo barco foi ajustado utilizando valores da variação de nível das réguas entre a data da coleta do dado e a data do perfil a ser estabelecido, que teve seus valores interpolados a partir da ponderação da proximidade da estação a jusante e a montante do ponto observado; e

- a definição da escala espacial do perfil a ser representado, pois os dados GNSS apresentam erros aleatórios que são causados por erros no processamento e em função de movimentos do barco em relação à superfície de água; na Figura 5.23, pode se notar a aplicação de filtros para a construção de perfis em diferentes escalas espacial.

Em atenção à escala espacial dos perfis, os dados de receptores GNSS foram processados em uma frequência temporal de 30 segundos. Dependendo da velocidade de navegação do barco, esses receptores podem estar espaçados entre 100-200 metros de distância. A primeira questão suscitada é em qual resolução espacial poderia ser representada a declividade a partir desses dados. Para responder a esse dilema, é preciso tomar em conta os erros aleatórios presentes nas coordenadas verticais obtidas por dados GNSS e ver em qual resolução espacial esses dados são compatíveis, a fim de representar a informação com um grau de confiabilidade adequado para o estudo a ser realizado.

Por exemplo, a partir de erros médios quadráticos do processamento de dados GNSS, estimados no Capítulo 3, da ordem de 3,4 cm, seria impossível obter uma precisão milimétrica da informação de declividade em uma resolução espacial de 1km. Já para uma resolução espacial de 100 km, o significativo aumento de distância entre os pontos e a diminuição de erros aleatórios a partir da filtragem de dados, provavelmente, seriam capazes de descrever a declividade entre dois pontos em uma distância de 100 km a um nível de precisão milimétrica. No entanto, obviamente, representar dados de declividade a cada 100 km reduziria a informação hidrológica contida em janelas menores de espaço, ocultando uma informação de declividade que poderia ser extremamente válida ao estudo a ser realizado. Por essa razão, é fundamental a escolha da melhor resolução de declividade a ser representada, respeitando a precisão da informação a ser fornecida.

A utilização de filtros é muito comum na análise de dados GNSS em alta frequência, consoante exemplo do estudo de FUND *et al.* (2011), que utilizou o filtro de

Vondrak (ZHENG *et al.*, 2005) como modo de filtragem, eliminando ruídos encontrados no processamento de dados GNSS de alta frequência. Para tal, foi utilizado o tamanho de janela de 1 hora. A justificativa para escolha desse valor reside na sua capacidade de eliminarem movimentos aleatórios de atitude da antena e de adequação com o modelo de troposfera utilizado, na medida em que o mesmo tinha resolução de 1 hora.

Para o estudo de filtros aplicado aos perfis GNSS obtidos para posterior cálculo da declividade entre os pontos do perfil, a primeira particularidade está na consideração dos valores obtidos dos perfis em função da distância entre os pontos. Para essa questão, foi desenvolvido um algoritmo computacional de forma a escolher a resolução espacial ideal para representar os dados de declividade.

O algoritmo funciona da seguinte forma:

- seleciona-se o tamanho de janela a partir da qual se deseja filtrar os dados; foram feitos testes para janelas de 1, 5, 10, 25, 50 e 100 quilômetros;
- a partir do primeiro dado amostrado, são selecionados todos os valores contidos no tamanho da janela;
- é feita a regressão linear dos valores dentro da janela, retirando a declividade linear dos valores;
- calcula-se o desvio padrão de todos os valores, após a retirada da declividade média;
- eliminam-se os valores superiores a três (3) vezes o desvio padrão (*outliers*);
- calcula-se a distância média e altura média dos valores restantes na janela; e
- após a realização de todas as etapas descritas acima, a janela é deslocada pelo passo escolhido e refeita a seleção de dados.

Essa opção de filtro permitiu eliminar dados espúrios encontrados e avaliar o desvio padrão para cada conjunto de dados contidos em cada tamanho de janela espacial escolhida. A Figura 5.23 mostra o exemplo do perfil de declividade do rio Madeira, apresentando a informação de declividade para cada opção de filtro. A Figura 5.23 apresenta, também, os filtros espaciais aplicados na construção dos perfis de

declividade. A declividade foi escolhida para testar o melhor filtro, de forma a analisar, para cada filtro, se todos os valores de declividade possuíam valores positivos.

Filtros nos dados GPS / Declividade dos Rios Madeira e Amazonas

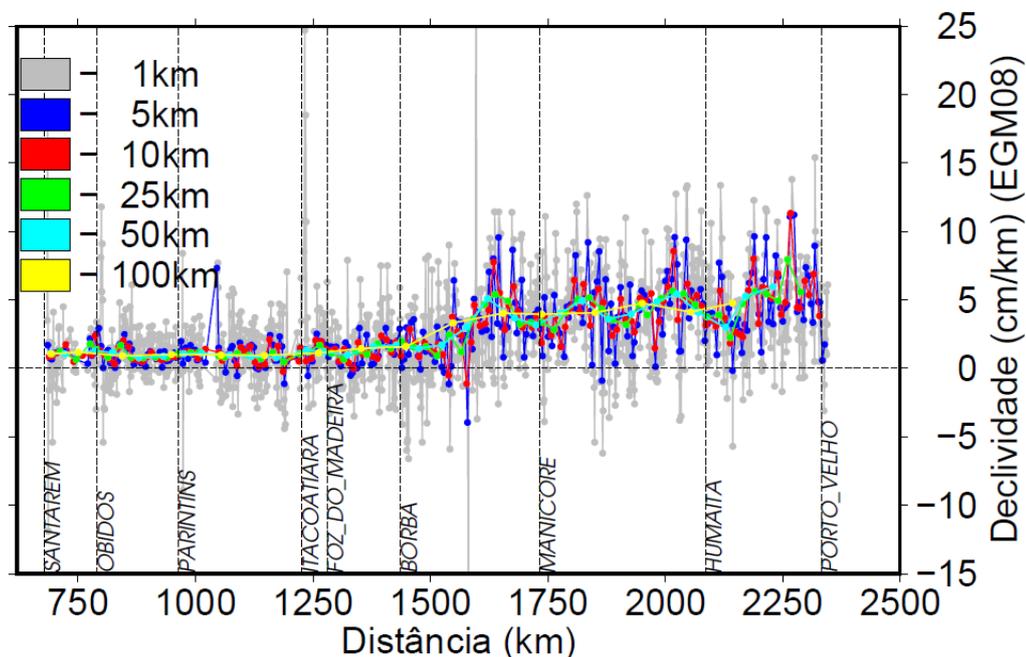


Figura 5.23 – Perfil de declividade dos rios Madeira e Amazonas e os diferentes filtros espaciais aplicados.

Como não existem meios de avaliar se os valores de declividade são erros oriundos do modelo do geopotencial ou de condições hidrodinâmicas extraordinárias, tomou-se em conta que valores de declividade negativa representam erros de processamento e movimentos do barco, que devem ser, portanto, devidamente filtrados.

Considerando a análise em todos os perfis e conforme o apresentado na Figura 5.23, toma-se o valor de 25 km como aquele que permitiu representar valores de declividade da forma mais adequada. Ressalta-se que a aplicação do filtro espacial repercute na perda de resolução da declividade, mas visa a descrever o perfil do rio de forma mais apropriada. Novas técnicas de processamento, maior controle dos movimentos do barco e melhorias de modelo do geopotencial podem aumentar a precisão dos dados coletados de forma a possibilitar seleção de filtros com menores janelas espaciais. Pode-se considerar que a restrição da resolução espacial do modelo do geopotencial EGM08, utilizado neste trabalho, está associada com dados amostrados espacialmente a cada 9,8 km x 9,8 km, sendo incoerente a definição de declividade para aplicações hidrológicas em escalas melhores que a do modelo geoidal.

Conforme mencionado acima, na Figura 5.24, percebe-se que diferentes valores gerados por diferentes modelos do geopotencial podem alterar as características de declividade. No entanto, como anteriormente salientado, na falta de meios para estimar o melhor modelo do geopotencial a ser selecionado, foi adotado o modelo do geopotencial EGM08 de forma a adotar as convenções do IERS (2010).

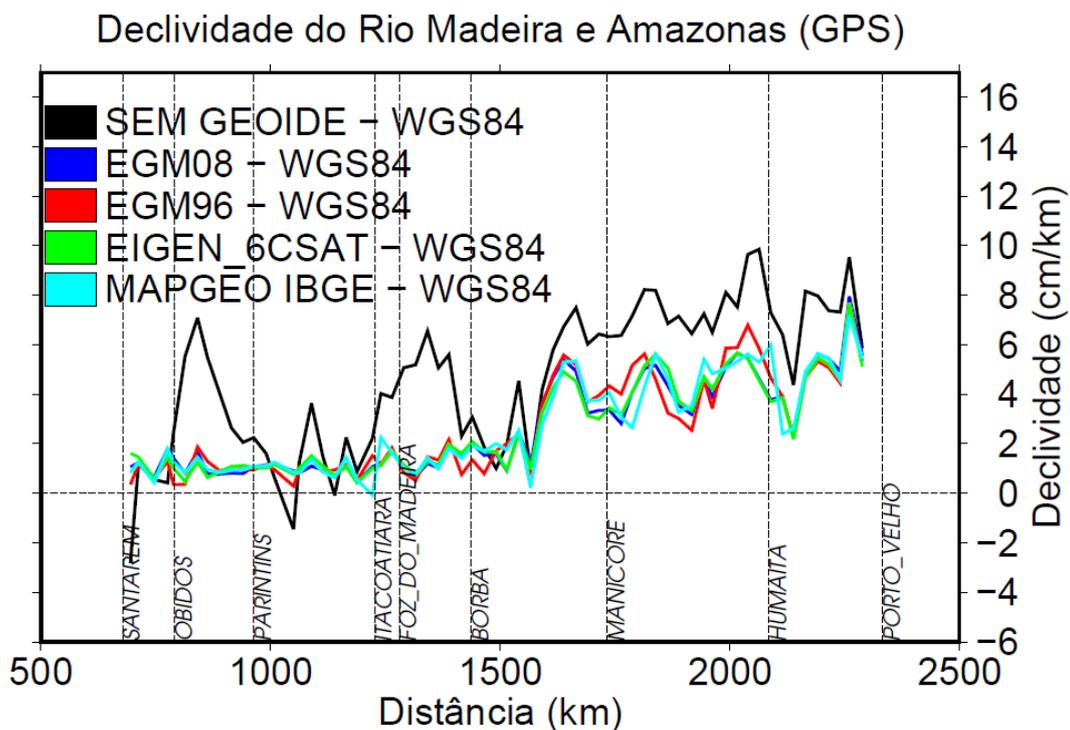


Figura 5.24 - Variações de declividade para diferentes modelos do geopotencial aplicados a um mesmo perfil observado.

A partir da escolha do filtro de resolução espacial e do modelo do geopotencial EGM08, serão apresentados, nas Figuras 5.25 a 5.27, os perfis longitudinais dos rios amazônicos coletados durante as 16 campanhas de campo fluviais, mencionadas anteriormente.

Perfil do Rio Madeira e Amazonas

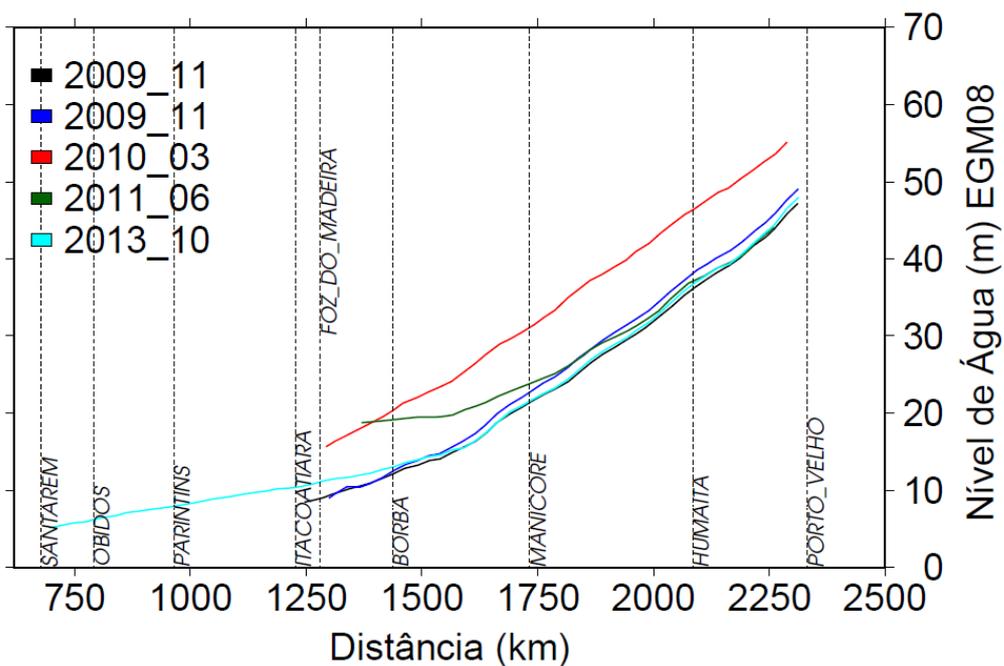


Figura 5.25 - Perfis longitudinais coletados a partir de receptores GNSS instalados a bordo de embarcações em campanhas fluviais realizadas nos rios Madeira e Amazonas.

Perfil do Rio Solimões e Amazonas

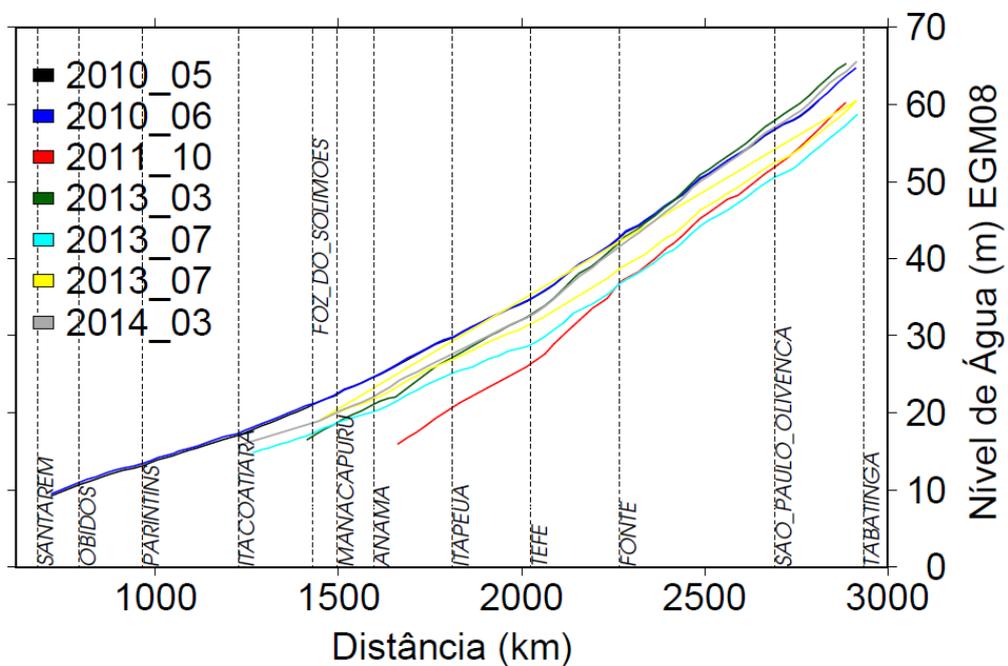


Figura 5.26 - Perfis longitudinais coletados a partir de receptores GNSS instalados a bordo de embarcações em campanhas fluviais realizadas nos rios Solimões e Amazonas.

Perfil do Rio Negro e Amazonas

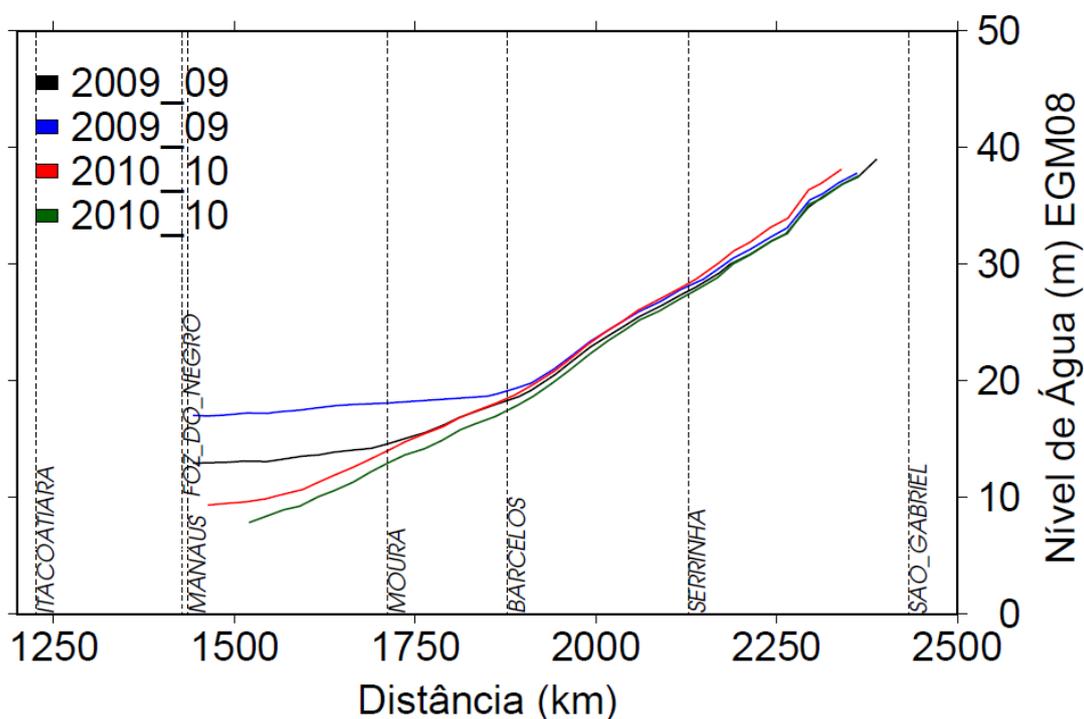


Figura 5.27 - Perfis longitudinais coletados a partir de receptores GNSS instalados a bordo de embarcações em campanhas fluviais realizadas nos rios Negro e Amazonas.

Igualmente aos dados de perfis longitudinais obtidos através de dados de régua fluviométricas, é possível, também, obter os perfis de declividade dos rios amazônicos navegados ao longo das 16 campanhas fluviais. Nesses perfis, é possível notar o ganho de resolução espacial ao comparar com dados dos perfis de régua, bem como as constantes variações de declividade que se pode assemelhar a uma variação senoidal em alguns trechos desses rios. Neste estudo, foram realizadas tentativas de detectar algum comportamento periódico na variação de declividade. Contudo, as análises espectrais dos perfis não indicaram qualquer comportamento padrão dessa variação. Nas Figuras 5.28 a 5.30, são apresentadas as variações de declividade dos rios amazônicos para uma resolução espacial de 25 km.

Dados GPS a 25km / Declividade dos Rios Madeira e Amazonas

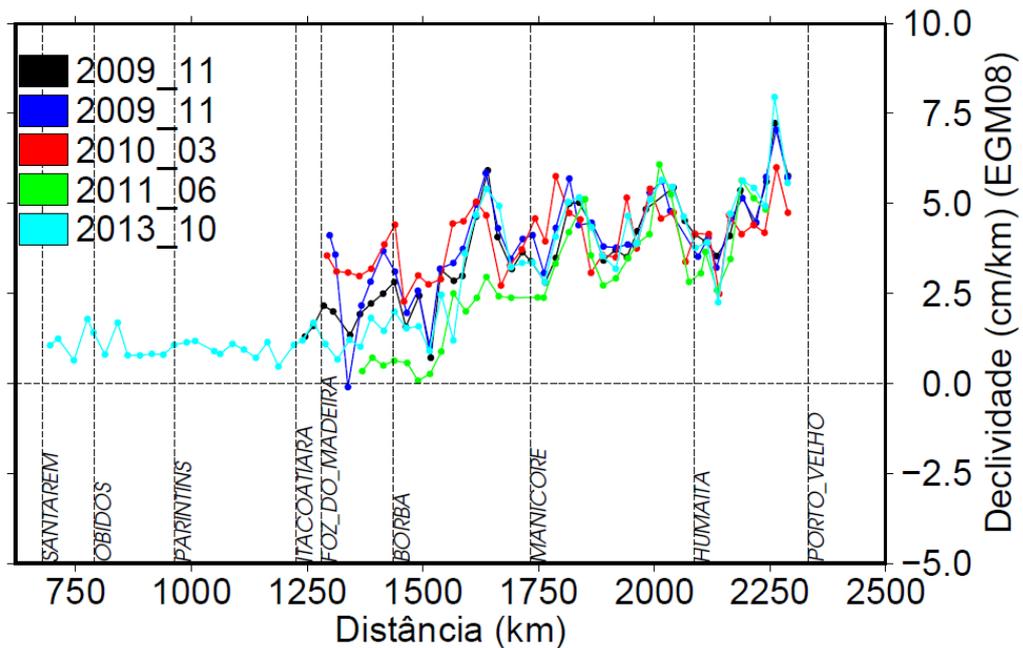


Figura 5.28 - Perfis de declividade dos rios Madeira e Amazonas, gerado a partir dos dados de perfis longitudinais obtidos por receptores GNSS.

Dados GPS a 25km / Declividade dos Rios Solimões e Amazonas

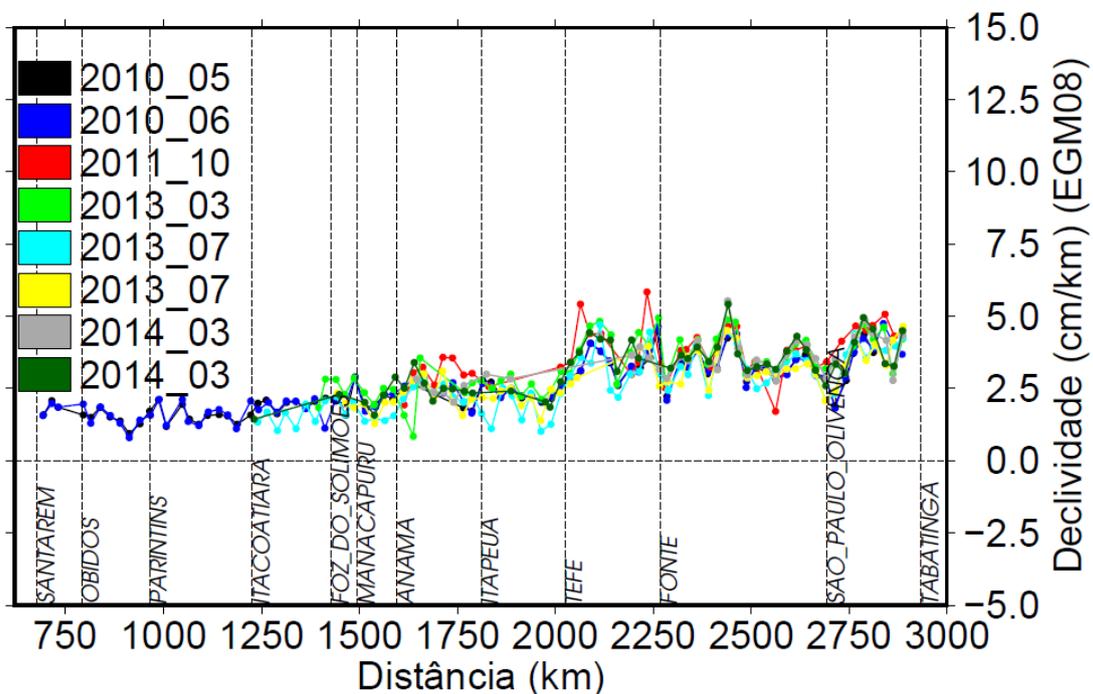


Figura 5.29 - Perfis de declividade dos rios Solimões e Amazonas, gerado a partir dos dados de perfis longitudinais obtidos por receptores GNSS.

Dados GPS a 25km / Declividade dos Rios Negro e Amazonas

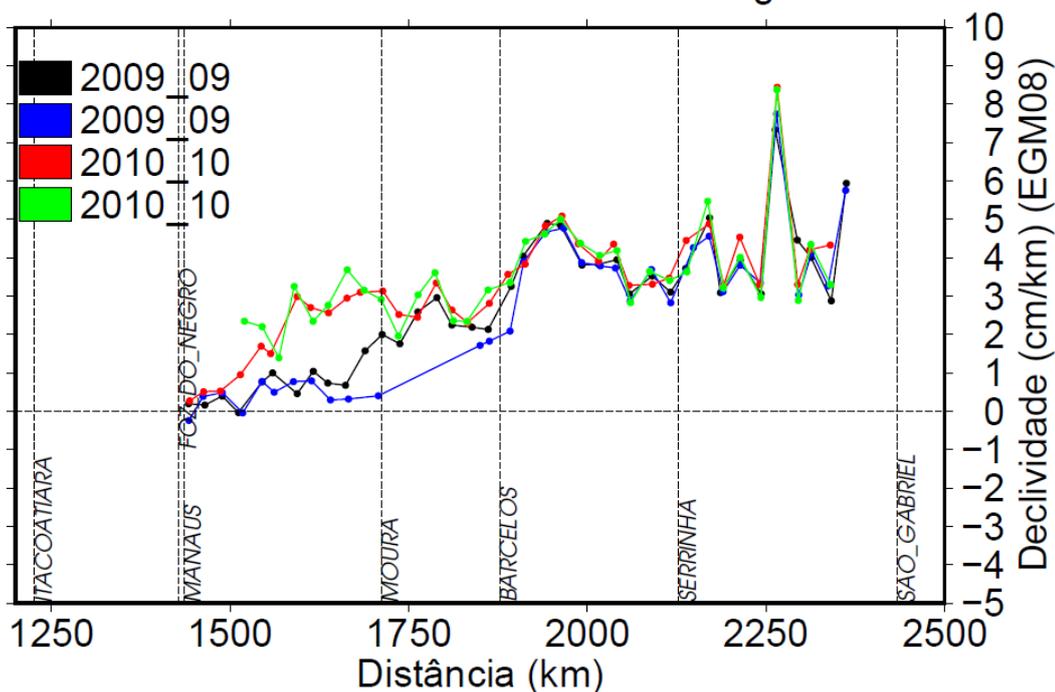


Figura 5.30 - Perfis de declividade dos rios Negro e Amazonas, gerado a partir dos dados de perfis longitudinais obtidos por receptores GNSS.

Conforme já mencionado, na Figura 5.31, é possível notar a grande diferença de resolução espacial nos perfis de declividade obtidos pelos dados de régua em comparação com os perfis de declividade obtidos por dados GNSS. Na Figura 5.31, é possível notar diferenças de até 4 cm/km entre as duas resoluções, o que pode ocasionar um erro, no nível do metro, ao se propagar o nível para regiões próximas a montante e a jusante da estação de monitoramento. Em muitos trechos dos perfis apresentados nas Figuras 5.28 à 5.30, a variação de declividade mostrou-se constante ao longo do tempo, fazendo que esses dados de perfis obtidos por receptores GNSS possam agregar uma informação importante ao monitoramento e modelagem hidrodinâmica da bacia Amazônica.

Comparação de dados de régua e GPS - Declividade dos rios Amazonas e Madeira 28/11/2011

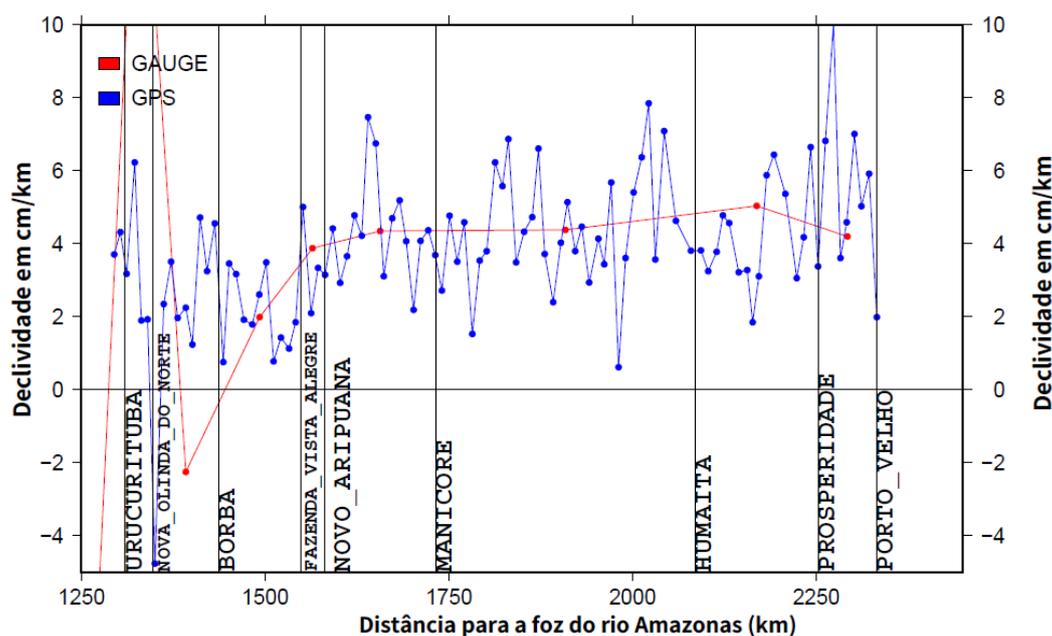


Figura 5.31 - Diferença na escala espacial de perfis de declividade obtidos entre réguas fluviométricas e do perfil de declividade GPS na escala de 25 km de resolução.

5.3 Análise de dados de altimetria espacial

Uma das principais contribuições de levantamentos realizados a partir de receptores GNSS na obtenção de altitude do zero das réguas linimétricas e da caracterização de perfis de linha de água está no auxílio para avaliação de dados de altimetria espacial na obtenção de dados de nível de água dos rios e lagos amazônicos.

Nessa temática, o trabalho de SILVA (2010), sem a utilização de dados GNSS, conseguiu avaliar dados de altimetria em sua capacidade de realizar medições hidrológicas, mais especificamente, mensurações de variações volumétricas de áreas úmidas e lagos, avaliações essas realizadas para o satélite ENVISAT (algoritmos Ice-1 e Ice-2) e para o satélite ERS-2 (algoritmo Ice-2). Porém a falta de disponibilidade de dados GNSS restringiu geograficamente a escolha de pontos de avaliação, limitando, em sua análise, o uso de informações a pontos de cruzamento de dados de altimetria, em um mesmo local, para uma calibração interna e/ou na utilização de réguas fluviométricas próximas. Esse procedimento tornou possível avaliar dados de altimetria que fossem próximos às réguas linimétricas. Baseando-se na suposição de que os dados

de altimetria selecionados estejam próximos aos dados das réguas, ambos os dados teriam o mesmo comportamento hidrológico.

Outras restrições estão presentes na avaliação de dados de altimetria sem as informações obtidas a partir receptores GNSS. Uma delas é que a falta de uma referência altimétrica comum entre a régua e o dado de altimetria impossibilita a detecção de erros sistemáticos que podem estar contidos no dado de altimetria espacial. CRETAUX *et al.* (2009, 2011) mostrou, em seus estudos, realizados no lago Issykul, na Ásia Central, que existem erros sistemáticos nos dados de altimetria dos satélites Jason-2 e ENVISAT, e esses erros não são negligenciáveis. Posteriormente, CALMANT *et al.* (2012) e SEYLER *et al.* (2013), utilizando os dados, referenciados ao geóide usando o EGM08, de réguas linimétricas para região Amazônica, processados e desenvolvidos ao longo desta tese e também apresentados neste capítulo, calcularam, pela primeira vez, erros sistemáticos desses mesmos satélites para os rios amazônicos.

Os estudos de CALMANT *et al.* (2012) e SEYLER *et al.* (2013) contaram apenas com os valores das altitudes do nível de água das réguas. A inexistência de perfis longitudinais dos rios, que podem ser adquiridos através de dados GNSS, tornou necessário produzir estimativas da declividade entre o local de passagem do satélite e da régua para cumprir o objetivo da avaliação desses erros sistemáticos de satélites altímetros.

Mais especificamente, no estudo de SEYLER *et al.* (2013), ainda é mencionado o fato de que foram encontradas inconsistências na avaliação do erro sistemático, detectados em estações fluviométricas muito distantes dos locais de aquisição de dados de satélite, justamente pelo fato de pequenos erros na estimativa da declividade serem aumentados quando multiplicados por grandes distâncias.

A questão da declividade fica ainda mais crítica na avaliação de dados das missões espaciais de altimetria que não possuem órbitas fixas (ou com pequenas variações), pois satélites altímetros, como, por exemplo, o ENVISAT e o JASON-2, por possuírem órbitas fixas (ou pequenas variações), permitem que, a cada ciclo do satélite, observe-se o mesmo ponto, criando, assim, uma série temporal de dados na localidade observada, que pode ser analisado sob a perspectiva do que se denomina estação virtual (CALMANT e SEYLER, 2006). Um dos exemplos contrários à perspectiva de estação virtual está na consideração do satélite ICESAT, pois possui grandes variações de órbita

a cada ciclo. Devido a esse fato, poucos estudos dedicam-se à análise dos dados desse satélite. O único existente para bacia Amazônica é o de HALL *et al.* (2011), que propôs o uso de altimetria espacial como ferramenta de obtenção de uma referência global para as réguas linimétricas, no qual utiliza passagens do satélite ICESAT para obter a altitude do zero das estações fluviométricas. Para a execução de tal desígnio, fez-se necessária a utilização de poucas passagens do próprio satélite ICESAT de forma a estimar as declividades nos trechos estudados. Na análise das altitudes do zero da réguas realizada por HALL *et al.* (2011) em contraste com a altitudes do zero das réguas obtida neste capítulo desta tese, encontraram-se discrepâncias, conforme apresentadas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Avaliação das altitudes do zero de réguas fluviométricas obtida pelo satélite ICESAT (Hall *et al.*, 2011) em relação dos valores obtidos por receptores GNSS alcançados nesta tese.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	CÓDIGO HIDROWEB	DIFERENÇA ENTRE ICESAT E GPS (metros) (HALL <i>et al.</i>, 2011)
PORTO DE MANAUS	14990000	-0,75
ANAMA	14050000	-0,49
ITAPEUA	13150000	-0,70
MANACAPURU	14100000	-0,59
CODAJÁS	13155000	0,17

Conforme detalhamento apresentado no Capítulo 3, os levantamentos geodésicos estáticos realizados por receptores GNSS têm uma precisão estimada superior a 2 centímetros. As grandes diferenças encontradas no estudo realizado por HALL *et al.*, (2011) levantam hipóteses de que os erros encontrados na aplicação de tecnologias de altimetria espacial, no caso específico para obtenção de altitude do zero de régua linimétrica, podem advir principalmente das seguintes causas:

- erro aleatório ou sistemático em função dos dados de altimetria espacial e dos modelos de correção utilizados;

- erro da estimativa de declividade em função da informação empregada, dado altimétrico ou dado de régua;
- erro nos dados de régua utilizados.

Os dados de régua podem, realmente, afetar, de forma significativa, a análise de dados de altimetria, mas que, em seu estudo, HALL *et al.* (2011) utilizou centenas de dados de satélite e réguas. Por essa razão, o uso de sucessivas passagens próximas a uma mesma régua ao longo das séries de 2003-2009, geradas pelo ICESAT, deveriam atenuar as inconsistências encontradas nos valores de régua utilizados.

Como não foram encontrados na bibliografia artigos sobre a existência de erros sistemáticos do satélite ICESAT e sobre a estimativa dos erros do ICESAT, nota-se que as diferenças de altitudes do zero por satélite em relação ao valor obtido por meio de réguas encontradas por HALL *et al.* (2011) são bem maiores do que as diferenças encontradas de altitudes do zero por GNSS nesta tese. Talvez a hipótese mais provável seja de que essas diferenças encontradas são originadas de declividades mal estimadas entre os locais de aquisição de dados do satélite ICESAT e das réguas fluviométricas.

Com a finalidade de refazer a o estudo feito por HALL *et al.* (2011), verifica-se que, a partir de declividades obtidas nos levantamentos GNSS realizados neste estudo, é possível obter uma avaliação mais conclusiva dos dados do satélite ICESAT. Serão apresentados, a seguir, o procedimento de execução de perfis de declividade a partir de receptores GNSS instalados a bordo de barcos e comparações com outras fontes dessa mesma informação.

Para avaliação dos dados do satélite ICESAT, foram utilizados os mesmos procedimentos de HALL *et al.* (2011). Os dados do satélite ICESAT GLA14 (Zwally *et al.*, 2014), na sua versão 33, foram adquiridos pelo *website* NSIDC (*National Snow and Ice Data Centre* – Centro Norte Americano de dados sobre neve e gelo). Baixados os dados, os mesmos podem ser convertidos através de um código computacional na linguagem IDL (*Interactive Data Language*), que está disponível no endereço NSIDC, que permite criar arquivos textos em formato tabular.

Os arquivos textos gerados tem as seguintes informações:

- coordenadas do local no elipsóide do TOPEX;

- valor de altura no elipsóide do TOPEX; no caso, foram utilizados os dados sobre os corpos de água; essa altura representa o nível de água; e
- índice de ganho do sinal.

Os dados do ICESAT foram convertidos para o elipsóide do WGS84 e reduzidos ao geóide através do modelo do geopotencial EGM08 de forma a compatibilizar a análise aos levantamentos GNSS realizados.

Foram analisadas 445 passagens do satélite ICESAT sobre os rios da bacia Amazônica. As análises foram separadas em dois grupos: dados com e sem a correção do terreno, ou seja, foram analisados dados que tiveram correção em função da inclinação de terreno e dados não corrigidos nesse aspecto, por julgar essa correção indevida a amostras sobre a água, caso deste estudo. Em cada passagem, foram analisados, no mínimo, três (3) pontos e, no máximo, 50, de forma que o conjunto de pontos sobre o rio formasse uma medição hidrológica. Em média, foram analisados 11 pontos em cada passagem no caso de uso de todos dados (com correção e sem correção) e 7 pontos, em média, quando do emprego apenas de dados que não tiveram correção. Nessas 445 amostras, o maior desvio encontrado entre os pontos observados foi de 89 cm e o menor desvio foi de 1 cm, conforme apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Estatística das passagens analisadas do satélite ICESAT.

Estatística das passagens	
Total de passagens	445
Máximo número de pontos coletados em uma passagem	50
Mínimo número de pontos coletados em uma passagem	3
Média de pontos coletados usando dados com e sem correção	11
Média de pontos coletados utilizando apenas dados sem correção	7
Maior desvio encontrado nos pontos de uma mesma passagem	89 cm
Menor desvio encontrado nos pontos de uma mesma passagem	1 cm
Média dos desvios de uma mesma passagem usando dados com e sem correção	14 cm
Mediana dos desvios de uma mesma passagem usando dados com e sem correção	12 cm
Média dos desvios de uma mesma passagem usando dados sem correção	12 cm
Mediana dos desvios de uma mesma passagem usando dados sem correção	9 cm

Em média, os desvios encontrados para todas as amostras de cada passagem foi de 14 cm (com 12 cm de mediana) e 12 cm (com 9 cm de mediana) para somente os dados sem correção de terreno.

Após a seleção das passagens do satélite ICESAT, foram realizadas as comparações dos valores obtidos com dados de réguas fluviométricas. Nessa comparação, a qualidade da avaliação dos dados do ICESAT é dependente de três questões:

- precisão do dado do ICESAT;
- qualidade do dado de régua; e
- definição correta da declividade entre a régua e o local de passagem do ICESAT.

A partir da comparação entre os dados de régua e do satélite ICESAT, descontadas as diferenças de declividade entre os dois locais de aquisição de dados de nível de água, foi possível comparar, de forma correta, segundo o apresentado na Tabela 5.10, as diferenças (em metros) entre dados do ICESAT e dados de réguas em “*N*” passagens do satélite ICESAT em cada estação fluviométrica.

Tabela 5.10 - Diferença (em metros) entre as altitudes das estações fluviométricas referenciadas ao geóide através do modelo do geopotencial EGM08 obtidas pelo satélite ICESAT e aquelas obtidas mediante ocupações por receptores GPS.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	CÓDIGO_HIDROWEB	N	DIFERENÇA (metros)
TABATINGA	10100000	8	-0,06
SAO_PAULO_DE_OLIVENCA	11400000	35	0,07
SANTO_ANTONIO_DO_ICA	11500000	14	-0,05
LARANJAL	12873000	15	-0,09
TEFE_MISSOES	12900001	7	-0,01
ITAPEUA	13150000	9	0,07
COARI	13150003	18	0,09
CODAJAS	13155000	29	-0,12
ANAMA	14050000	23	-0,04
MANACAPURU	14100000	36	-0,03
CURICURIARI	14330000	19	-0,51
TAPURUQUARA	14400000	37	0,14
SERRINHA	14420000	37	0,04
MOURA	14840000	14	-0,13
MANAUS	14990000	25	-0,07
PORTO_VELHO	15400000	8	0,04
PROSPERIDADE	15490000	22	0,03
HUMAITA	15630000	17	-0,08
MANICORE	15700000	26	-0,03
NOVO_ARIPUANA	15850000	16	0,05
FAZENDA_VISTA_ALEGRE	15860000	10	0,06
BORBA	15900000	9	-0,02
NOVA_OLINDA_DO_NORTE	15940000	11	-0,17
MÉDIA		19 (TOTAL 445)	-0.04

Nas Figuras 5.32 a 5.35, podem ser observadas as medições do satélite ICESAT e das réguas fluviométricas, estimando-se a diferença de valores em cada passagem do satélite. As estações contidas nessas figuras são as mesmas estações utilizadas no estudo de HALL *et al.* (2011).

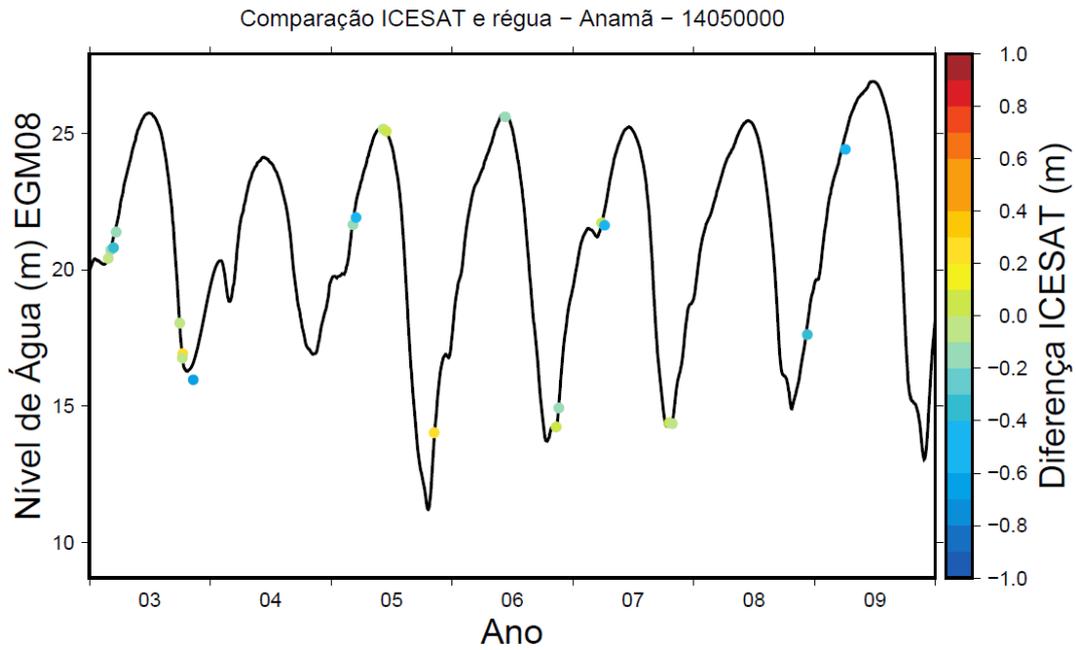


Figura 5.32 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluvimétrica de Anamã.

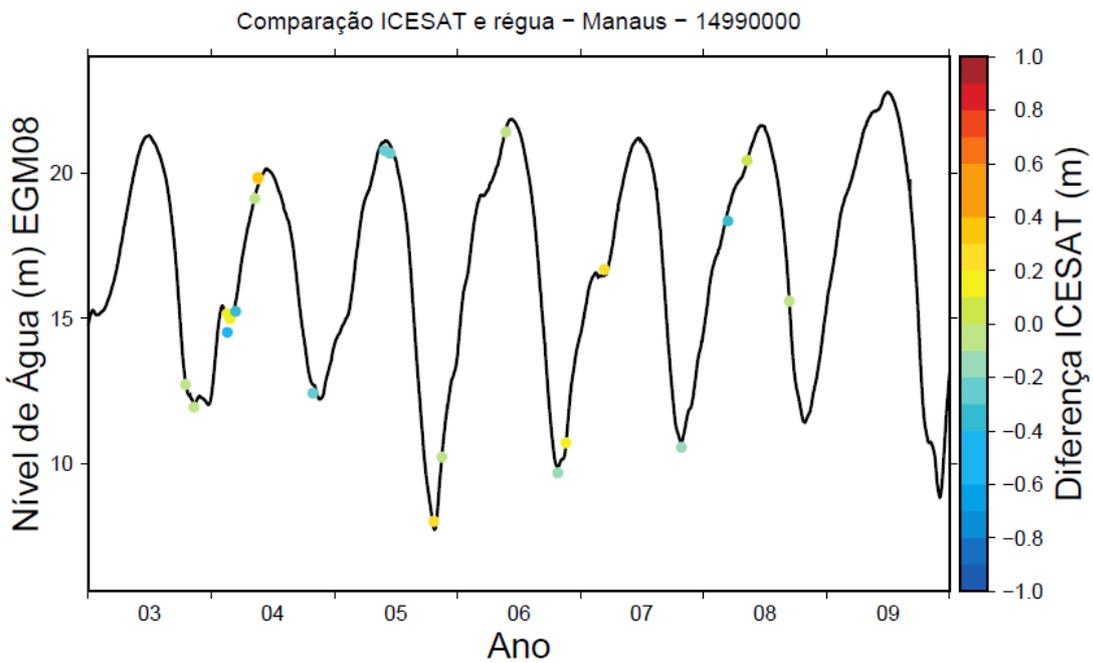


Figura 5.33 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluvimétrica de Manaus.

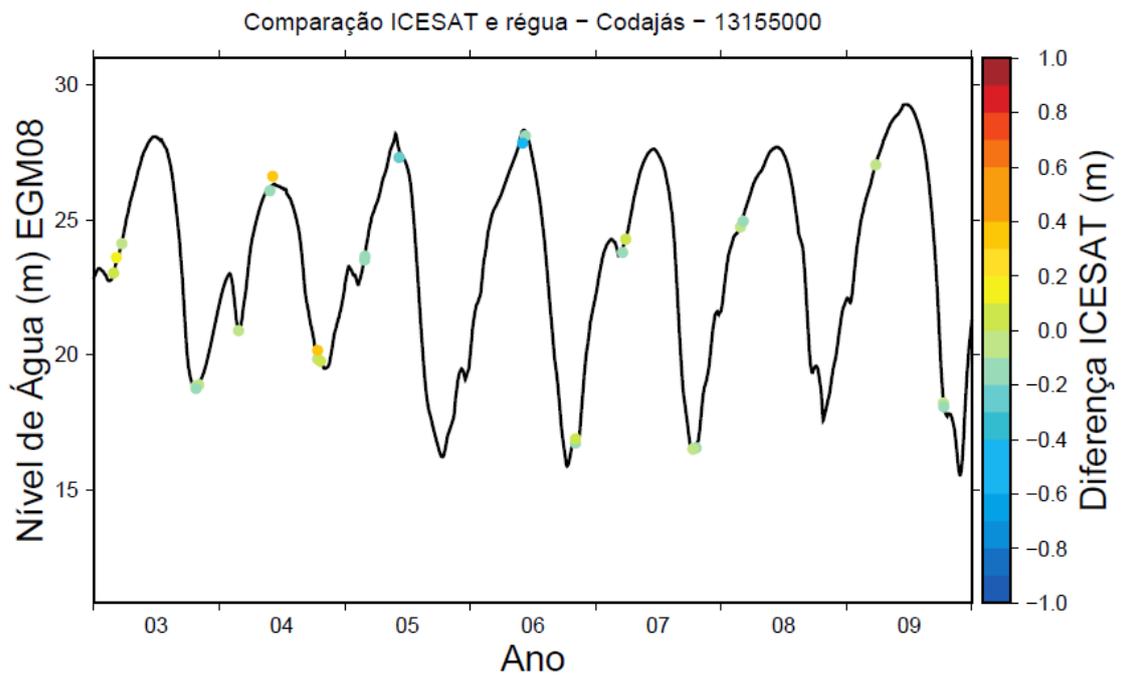


Figura 5.34 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluvimétrica de Codajás.

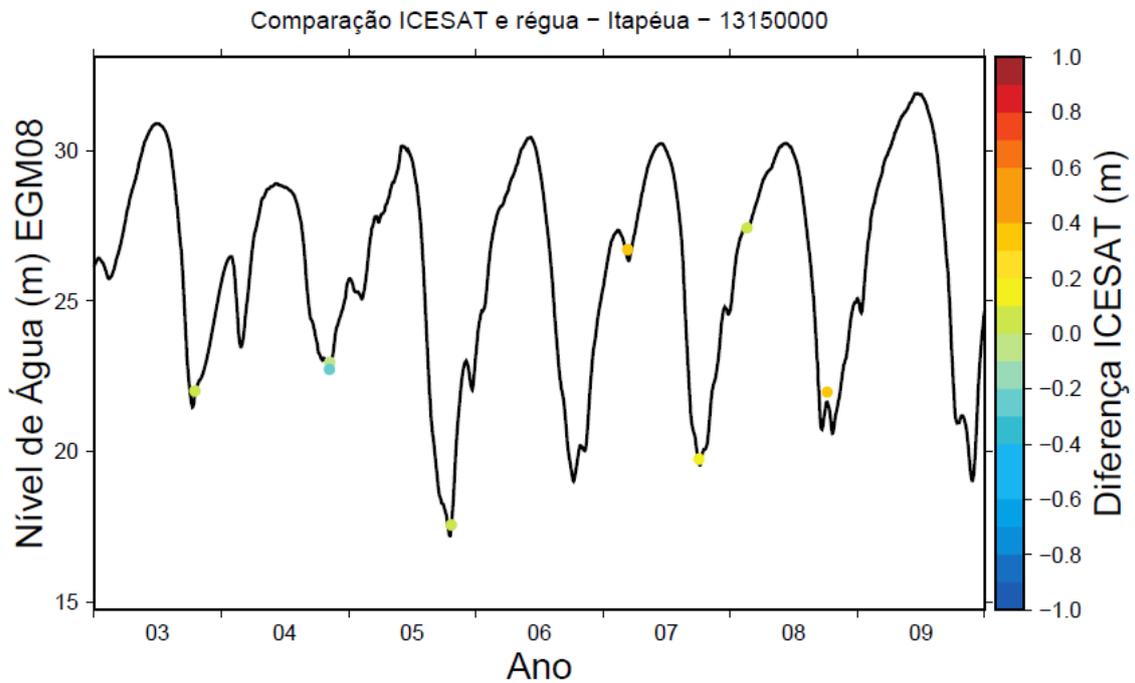


Figura 5.35 - Diferença entre dados de régua e dados do satélite ICESAT para estação fluvimétrica de Itapéua.

Os valores de diferença entre o estudo desta tese e o estudo realizado por HALL *et al.* (2011) podem ser visualizados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Comparação entre o estudo de Hall *et al.* (2011) e o estudo realizado nesta tese para aplicação de dados do satélite ICESAT.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	CÓDIGO HIDROWEB	DIFERENÇA	DIFERENÇA PARA ESSE ESTUDO
		ENTRE ICESAT E GPS (metros) (HALL <i>et al.</i> , 2011)	COM USO DA DECLIVIDADE GPS (metros)
PORTO DE MANAUS	14990000	-0,75	-0,07
ANAMA	14050000	-0,49	-0,17
ITAPEUA	13150000	-0,70	-0,02
MANACAPURU	14100000	-0,59	-0,10
CODAJÁS	13155000	0,17	-0,05

A partir da análise das diferenças obtidas, pode-se concluir que os erros na estimativa de declividade entre a estação fluviométrica e dados do ICESAT prejudicaram consideravelmente as análises realizadas por HALL *et al.* (2011). Essa demonstração da diferença entre as análises ressalta a importância dos levantamentos obtidos por receptores GPS em aplicações de calibração e validação de dados de altimetria espacial.

5.3.1 Perfis de altimetria espacial

Em consonância com os resultados de perfis apresentados, que foram, por sua vez, obtidos por dados de réguas fluviométricas e por receptores GPS instalados a bordo de embarcações, dados de altimetria gerados por estações virtuais dos satélites ENVISAT e JASON-2 podem ser observados na perspectiva de perfis longitudinais para comparação posterior com dados de réguas e perfis GPS.

As séries de altimetria espacial foram gentilmente cedidas pelo grupo RHASA (RECURSOS HÍDRICOS E ALTIMETRIA ESPACIAL DA AMAZÔNIA) – que é uma iniciativa da Universidade Estadual do Amazonas - UEA, em conjunto com o IRD, que se propõe, entre outros estudos, na disponibilização de séries fluviométricas obtidas

por radares altímetros para as aplicações hidrológicas. Com esse objetivo, analisam-se as séries do RHASA, com vistas a futuras aplicações desses dados pela comunidade científica, na continuidade deste estudo e no desenvolvimento de outras pesquisas.

Como dados de altimetria não são coletados na mesma época nos diferentes pontos da bacia Amazônica, resultando em defasagem temporal e conseqüente impossibilidade de um perfil gerado com dados adquiridos em um mesmo período, faz-se necessária a aplicação do seguinte procedimento. Primeiro, os dados de cada ponto do perfil tiveram de ser interpolados em dados diários, ou seja, uma interpolação entre os 10 dias de cada passagem do JASON-2 e de 30 dias para dados do ENVISAT. Depois, para redução dos ruídos dessa interpolação, foram calculadas as médias mensais das séries disponibilizadas desses satélites, abrangendo os anos de 2003 a 2009 para o ENVISAT e os anos de 2009 a 2011 para o JASON-2. A partir dessa simplificação, pode-se construir os perfis longitudinais, apresentados nas Figuras 5.36 a 5.41, com respeito aos rios Solimões, Amazonas, Madeira e Negro, considerando-se, respectivamente, os satélites ENVISAT e JASON-2. Para os perfis a seguir apresentados, pode-se perceber que, em valores absolutos de altura, os mesmos apresentam valores consistentes com os perfis obtidos por dados de réguas que tiveram suas altitudes levantadas e aqueles obtidos a partir de receptores GPS a bordo de embarcações. Na simplificação apresentada para construção desses perfis, cabe destacar que as séries de altimetria espacial podem ser adquiridas gratuitamente através dos centros espaciais. Se corretamente processadas, podem ser capazes de representar a variação espaço-temporal de altura dos cursos de água dos rios amazônicos com um ótimo grau de consistência.

Perfil Rio Solimões e Amazonas (Dados Envisat RHASA médias mensais 2003–2009)

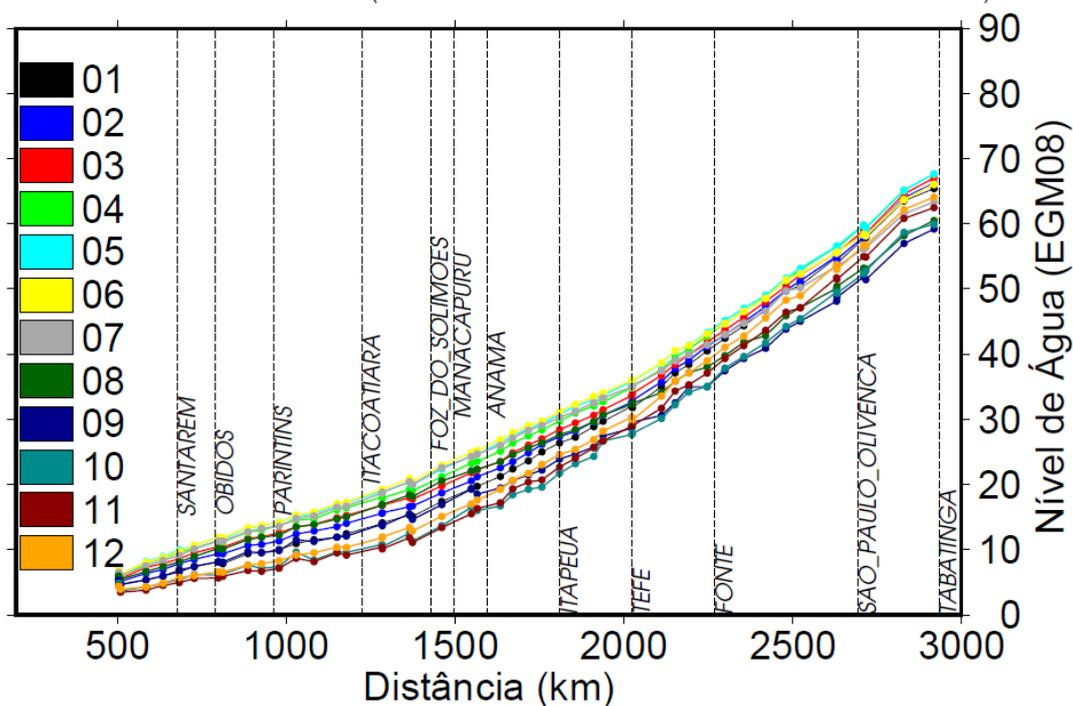


Figura 5.36 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite ENVISAT nos rios Solimões e Amazonas.

Perfil Rio Madeira e Amazonas (Dados Envisat RHASA médias mensais 2003–2009)

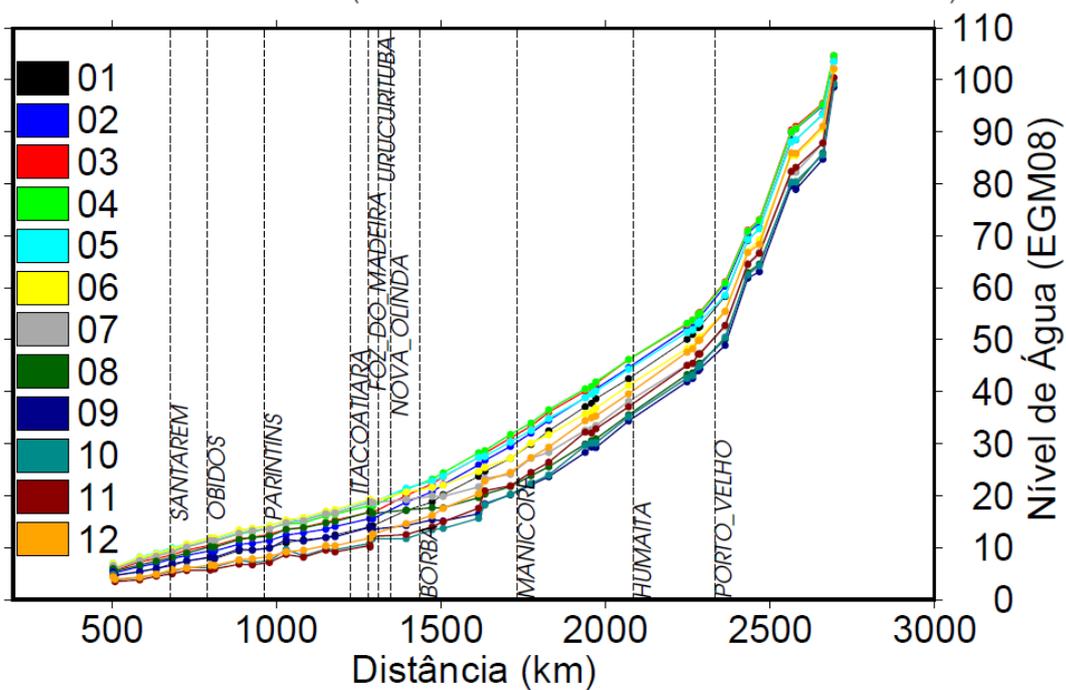


Figura 5.37 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite ENVISAT nos rios Madeira e Amazonas.

Perfil Rio Negro e Amazonas (Dados Envisat RHASA médias mensais 2003–2009)

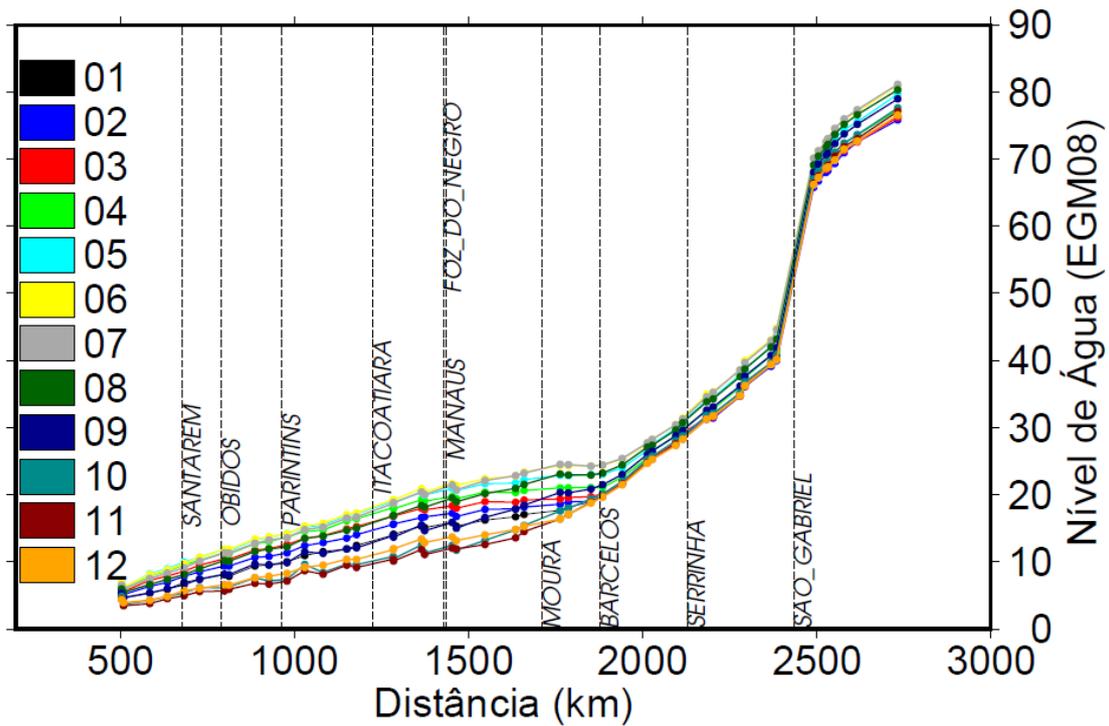


Figura 5.38- Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite ENVISAT nos rios Negro e Amazonas.

Perfil Rio Solimões e Amazonas (Dados Jason-2 RHASA médias mensais 2009–2011)

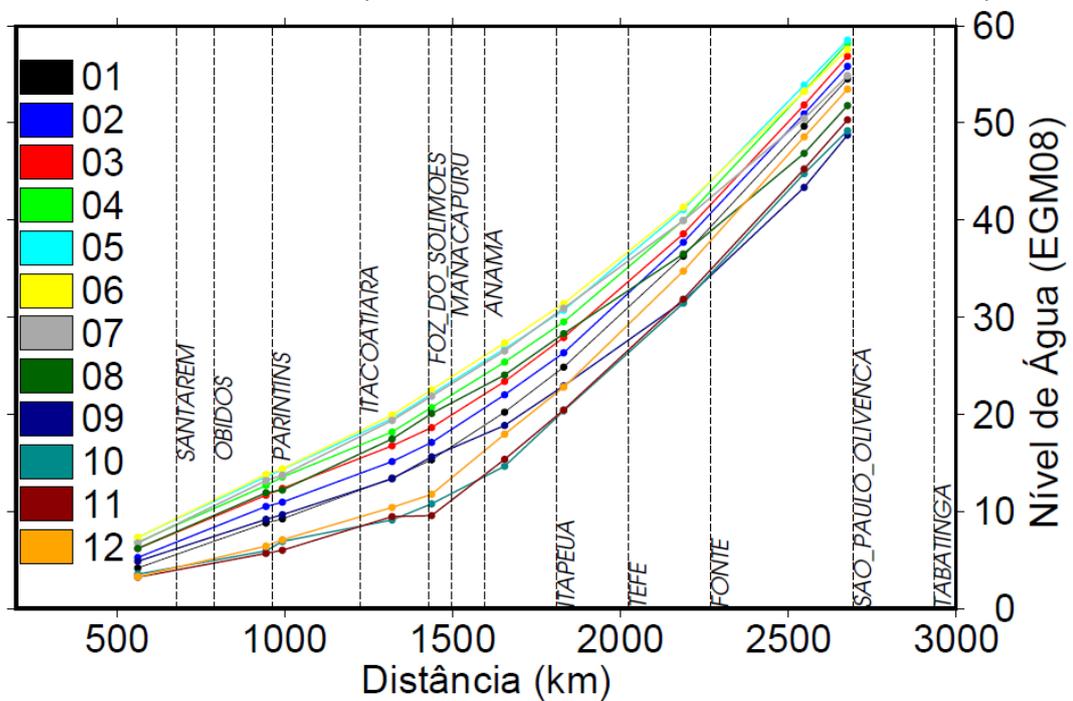


Figura 5.39 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite JASON-2 nos rios Solimões e Amazonas.

Perfil Rio Madeira e Amazonas (Dados Jason-2 RHSA médias mensais 2009-2011)

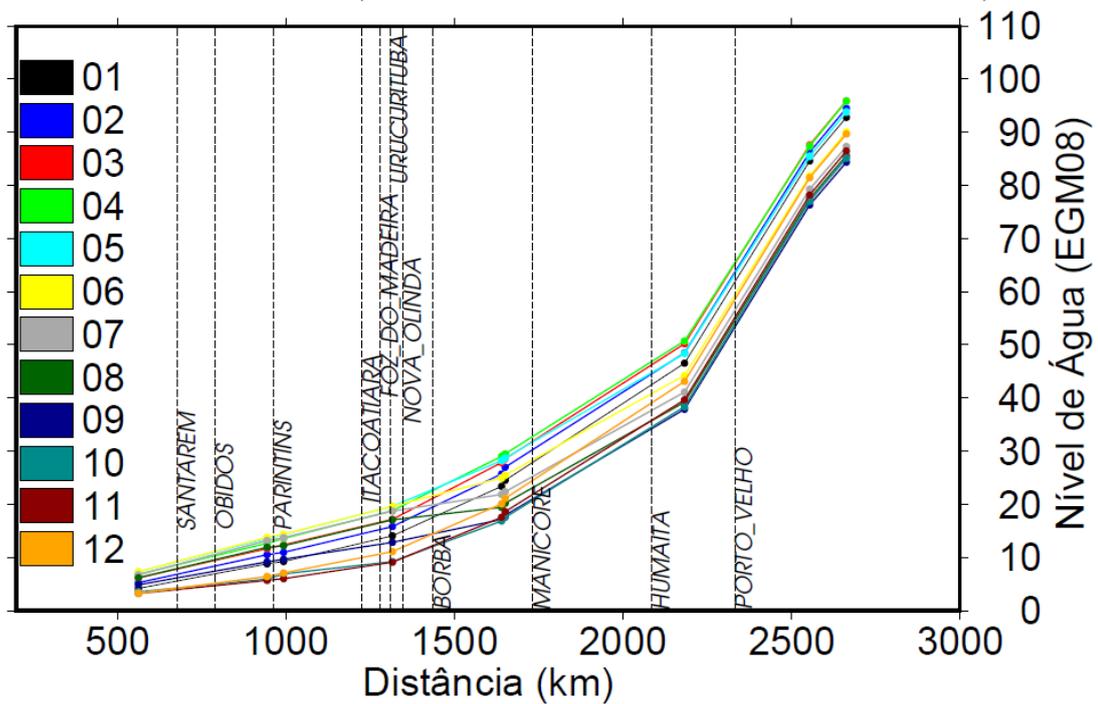


Figura 5.40 - Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite JASON-2 nos rios Madeira e Amazonas.

Perfil Rio Negro e Amazonas (Dados Jason-2 RHSA médias mensais 2009-2011)

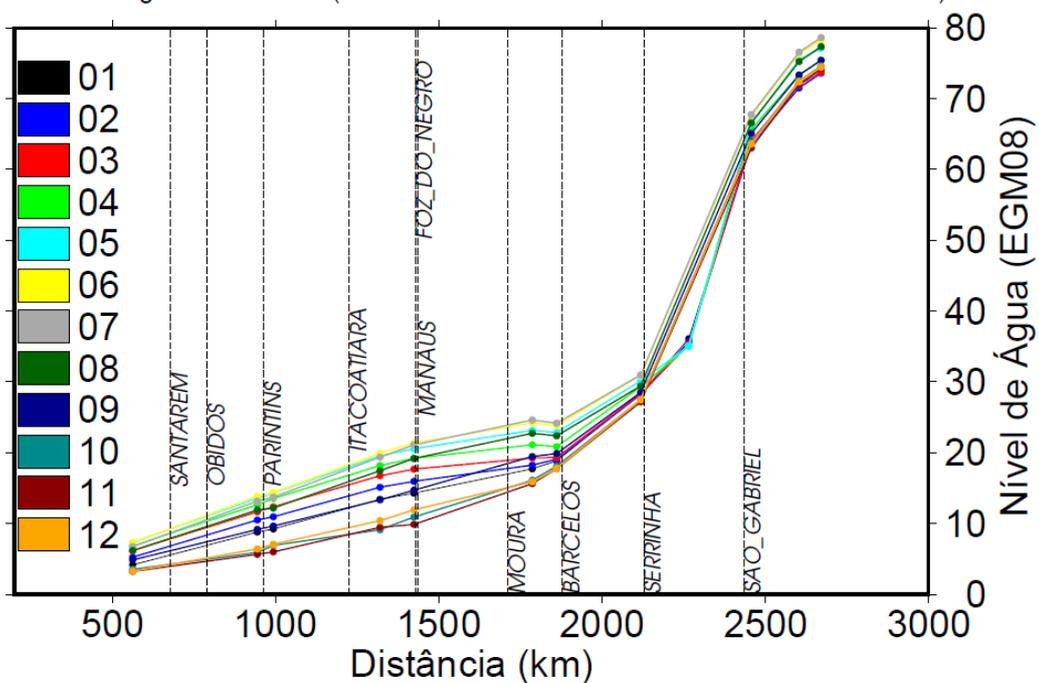


Figura 5.41- Perfis longitudinais gerados a partir de dados de estações virtuais do satélite JASON-2 nos rios Negro e Amazonas.

Como já mostrado anteriormente, dados de perfis de altura podem ser convertidos para dados de perfis de declividade, sendo apresentados os perfis de declividade para os rios Amazonas, Solimões, Madeira e Negro nas Figuras 5.42 a 5.47, inicialmente, para o satélite JASON-2, e, posteriormente, para o satélite ENVISAT.

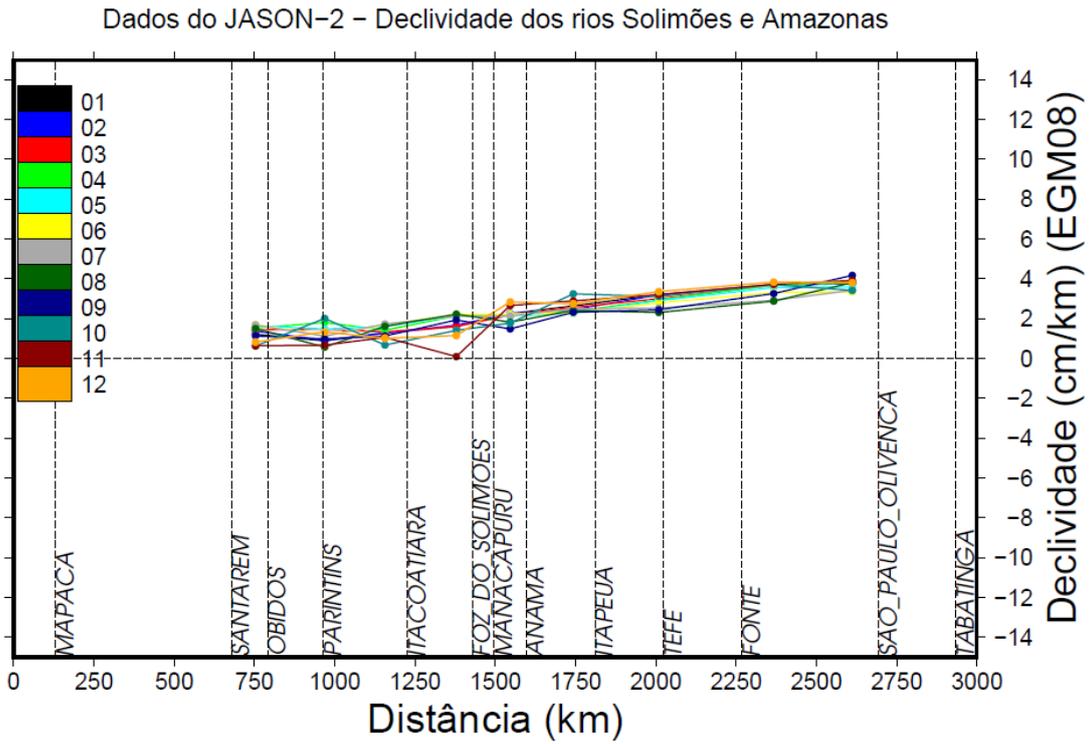


Figura 5.42- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Solimões e Amazonas.

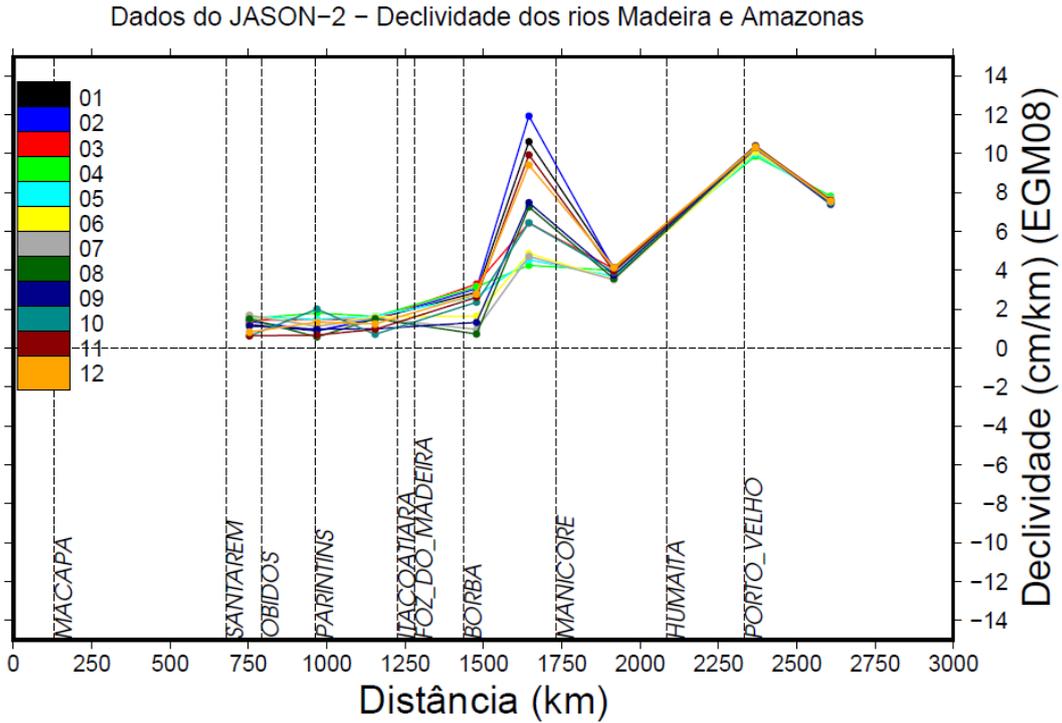


Figura 5.43- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Madeira e Amazonas.

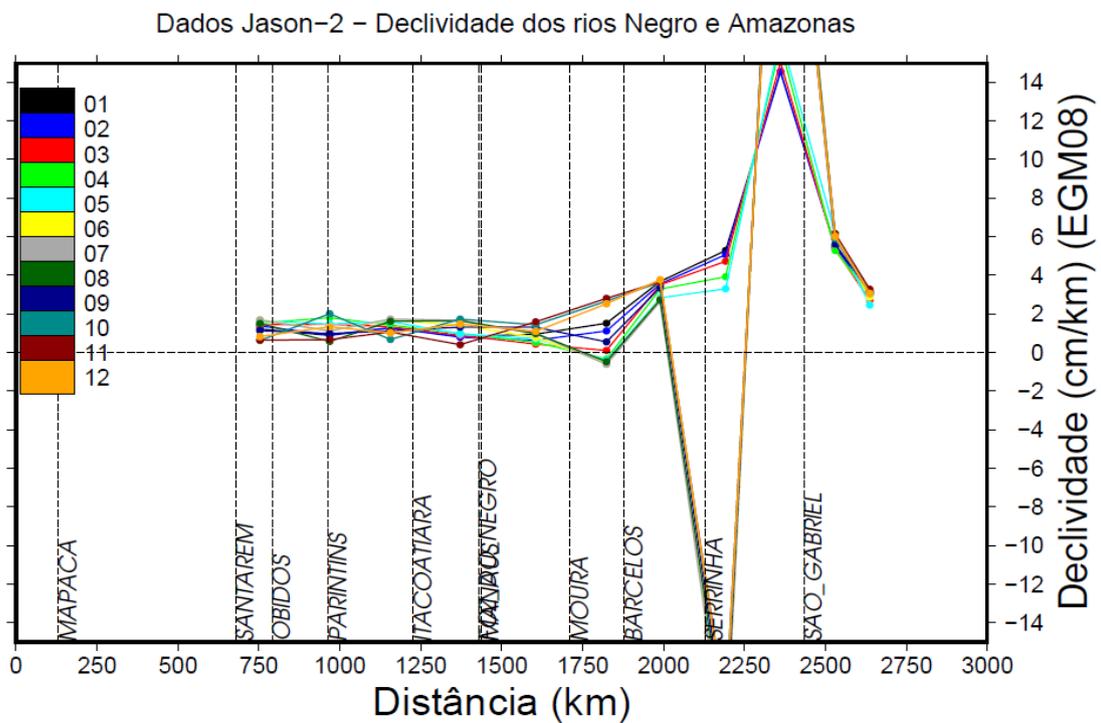


Figura 5.44- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Negro e Amazonas.

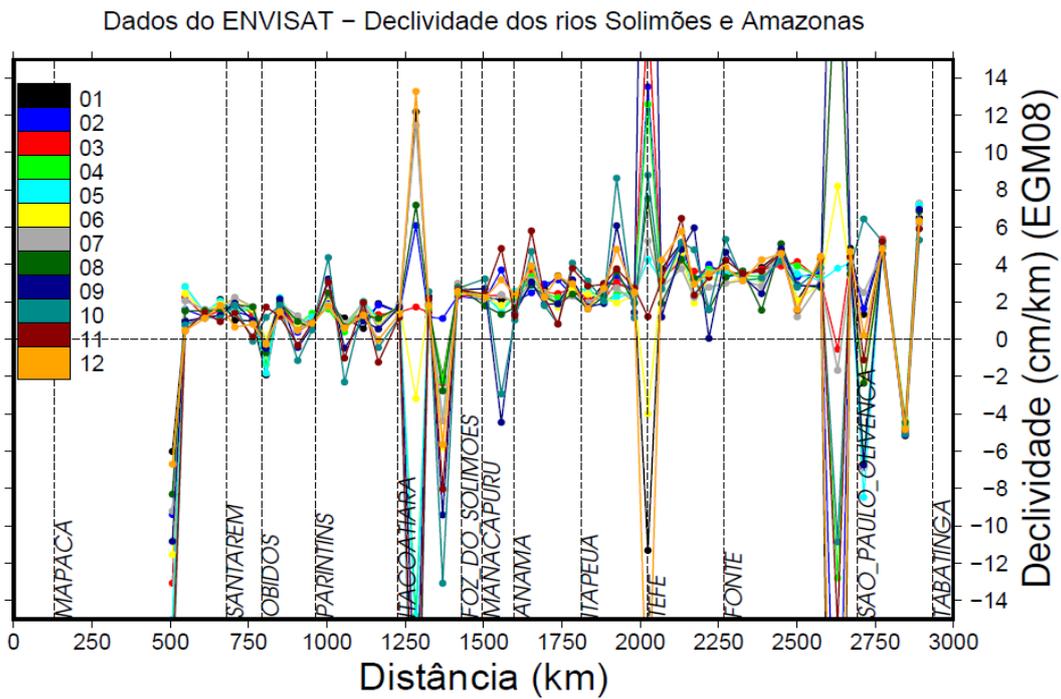


Figura 5.45- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite ENVISAT nos rios Solimões e Amazonas.

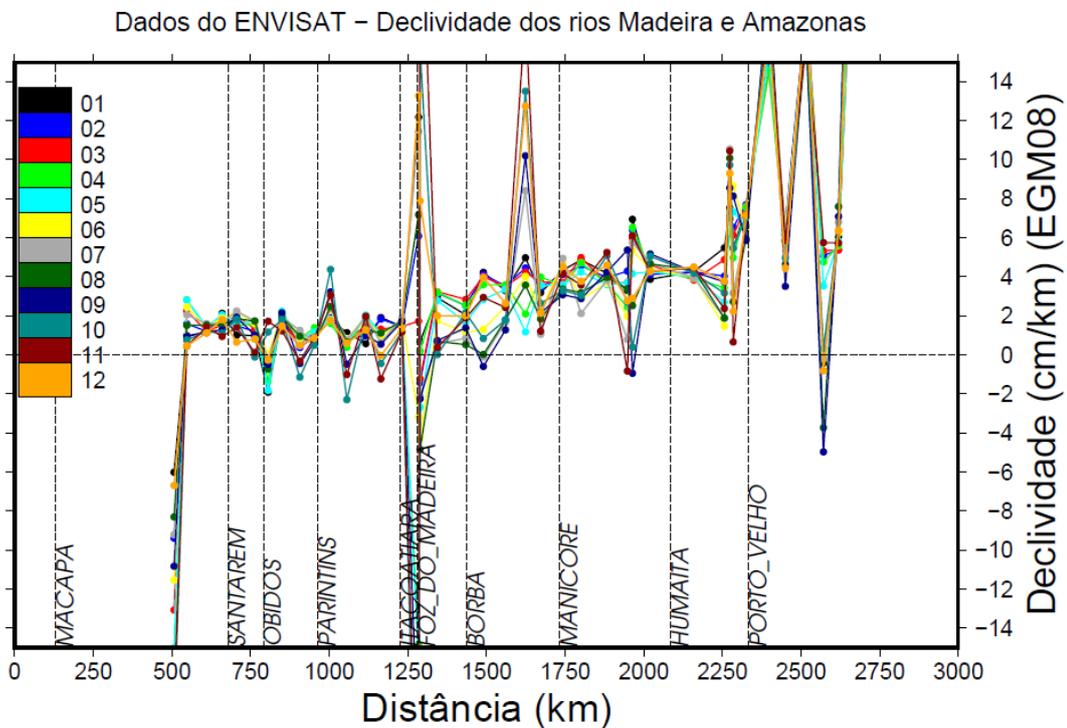


Figura 5.46- Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite JASON-2 nos rios Madeira e Amazonas.

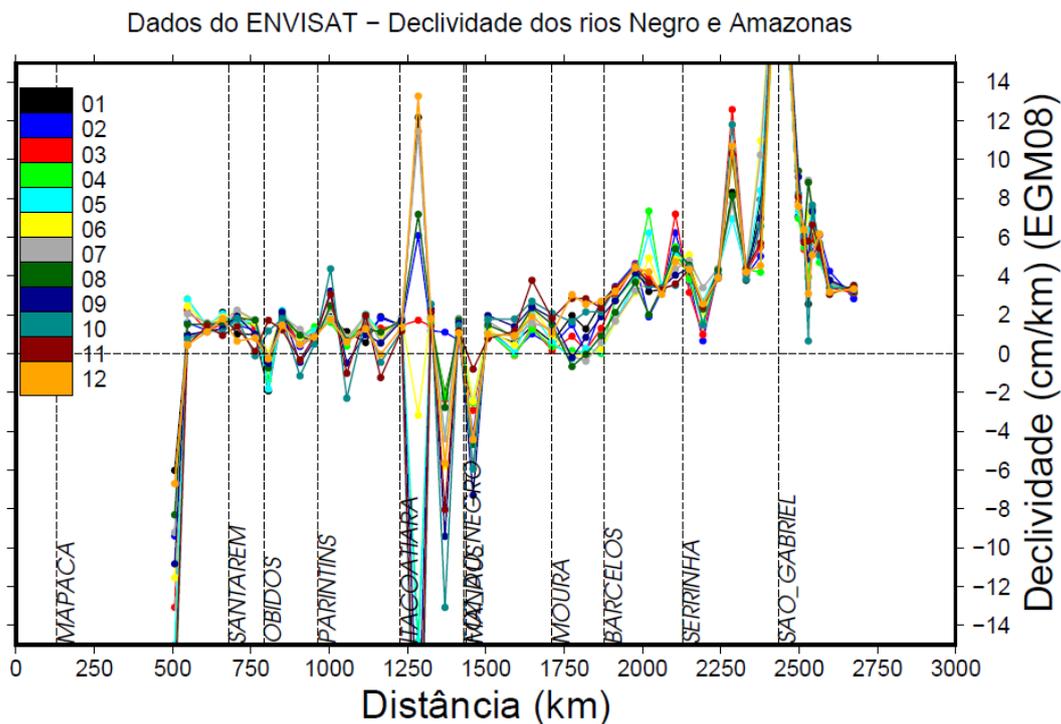


Figura 5.47 - Perfis de declividade gerados a partir de dados dos perfis longitudinais do satélite ENVISAT nos rios Negro e Amazonas.

Para os perfis de declividade apresentados, pode-se perceber que vários valores espúrios foram encontrados se comparados com os dados de perfis obtidos por receptores GNSS. Esses valores espúrios são justificados pela grande proximidade entre alguns locais de aquisição de dados de satélites. Essa proximidade resulta em uma resolução espacial superior ao nível de precisão dos dados de satélite, adicionados à simplificação aqui utilizada para a construção dos perfis, o que leva a produzir valores de declividade anômalos. No entanto, pode-se verificar, na maioria dos trechos, que os valores de declividade são consistentes com os valores de perfis obtidos por réguas ou receptores GPS. Nessa análise, pode-se concluir que se pode e que se deve buscar uma escala adequada para uso e aplicação de dados de altimetria espacial para obtenção de perfis longitudinais. Assim como realizado para dados GNSS, pode-se esperar que filtros espaciais sejam uma boa ferramenta a ser utilizada para dados de altimetria com objetivo de construção desses perfis. Esses dados podem ser utilizados em adição aos dados de régua na tentativa de aumento da resolução espacial para obtenção de parâmetros como a declividade em locais pouco monitorados.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Considerações finais

O exercício de reflexão sobre o trabalho realizado impõe traçarmos sua breve retrospectiva histórica, com o resgate da questão científica norteadora de sua trajetória, fundamentada no objetivo geral da tese, ou seja, de delinear um protocolo para levantamento das altitudes do zero das estações fluviométricas da rede convencional e obter perfis longitudinais dos principais rios Amazônicos em um grau de abrangência não alcançado em estudos pretéritos.

Face a esse desafio, o uso de dados geodésicos constitui-se como uma valiosa fonte de informação hidrológica, consolidando-se um novo campo de conhecimento que passou a se firmar, mais recentemente denominado de hidrogeodésia. Por meio de informações geradas por esses dados de natureza espaço-temporal, torna-se possível aperfeiçoar o conhecimento hidráulico-hidrológico da bacia Amazônica. O esforço empreendido, nesta tese, permitiu avaliar, com cautela, a precisão de dados coletados pelo monitoramento convencional e garantir uma maior confiabilidade da informação hidrológica que é disponibilizada para estudos hídricos e ambientais.

No atual cenário de avanço no desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à hidrologia, os dados geodésicos, notadamente no segmento de altimetria espacial, estão sendo, cada vez mais, aplicados em hidrometria e em modelagem hidrológica, respaldados por seu emprego crescente na literatura acadêmico-científica conjuntamente com iniciativas institucionais realizadas pela Agência Nacional de Águas – ANA através da sua plataforma HidroSat (<https://hidrosat.ana.gov.br>) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM por meio da condução do projeto de projeto Dinâmica Fluvial em parceria com IRD.

Por outro lado, conforme os apontamentos apresentados no capítulo introdutório e ao longo desta tese, faz-se necessário o conhecimento aprofundado de técnicas desenvolvidas a partir do cruzamento de dados de diversas fontes e métodos de processamento, pois o pesquisador ou usuário precisa estar atento quanto aos possíveis erros e limitações nos dados produzidos, o que enseja refletir sobre técnicas mais adequadas para o processamento mais adequado da informação. Escolhas

inapropriadas, entre as diversas fontes de informação e entre diversos modos de processamento e de análise, repercutem diretamente na capacidade desses dados produzirem informações confiáveis, como previamente mencionado. A aplicação desses dados em engenharia deve ser rigorosamente avaliada sob risco da produção de resultados errôneos, o que pode inclusive prejudicar o processo natural de aprimoramento e desenvolvimento da tecnologia.

Pode-se destacar que novos satélites gravimétricos, altimétricos e de constelações de posicionamento global serão lançados no futuro, todos com o objetivo de refinamento da qualidade da informação gerada por missões espaciais anteriores. Nesse sentido, é fundamental o progressivo desenvolvimento de pesquisas que avaliem não apenas a boa aplicabilidade e potenciais usos com finalidades hídrico-ambientais diversas, mas também de estudos que concentram atenção nas restrições e nos melhores métodos de processamento, tratamento e utilização desses dados básicos de suporte.

Muitos estudos de tecnologias geodésicas são desenvolvidos por pesquisadores de diversas partes do mundo mediante análises produzidas no território brasileiro, principalmente na bacia Amazônica, devido à importância da região no que concerne ao grande impacto que exerce no clima da Terra e também devido à grandeza de seus processos hidrometeorológicos, que, por exemplo, tem condicionado padrões de cheias e secas, não só na própria região amazônica, mas, em outras áreas, como a região sudeste do Brasil.

A adoção da escala da bacia Amazônica para condução dos estudos de altimetria e gravimetria espaciais justifica-se, em parte, em virtude de favorecer a percepção de fenômenos pelos sensores satelitais, já que oferecem, devido à limitação de resolução e precisão, dificuldade de observar fenômenos em outras regiões que sofrem os mesmos efeitos, porém com menor magnitude.

No atual momento, o desenvolvimento de satélites nessa temática encontra-se concentrado nos mercados norte-americano, europeu e asiático. Na medida em que evidenciam-se condições favoráveis para explorar essas novas tecnologias no território brasileiro, espera-se que os diversos trabalhos de pesquisa desenvolvidos por pesquisadores brasileiros previamente citados e referenciados nesta tese estimulem ações governamentais e garantam a participação do Brasil na parceria de missões

espaciais futuras dessas tecnologias, a exemplo do desenvolvimento em parceria do satélite altímetro Altika/Saral, parceria exitosa entre a França e a Índia.

No contexto atual de relevantes avanços da ciência, o conhecimento brasileiro gerado a partir de missões espaciais fica restrito no nível de processamento e no uso da informação de livre acesso, disponível pelas diversas agências espaciais ao redor do globo. Por questões estratégicas e de segurança sobre a parte de equipamentos de satélites, pré-processamento e mesmo de processamento, apenas parte da informação proveniente de satélites é disponibilizada, ou seja, os dados são, em grande parte, restritos e conseqüentemente podem acabar limitando a pesquisa e as aplicações que poderiam trazer informações úteis sobre o nosso território.

Baseado nessas considerações, o trabalho apresentado teve, portanto, como motivação central, a aplicação de dados geodésicos e sua avaliação em aplicações e estudos de monitoramento hidrológico. Três (3) objetivos científicos que dão suporte ao objetivo geral de referenciamento plani-altimétrico da rede de estações fluviométricas na região amazônica, rerepresentado no início desta seção, foram definidos, conforme o registro sintético abaixo:

- estudo dos movimentos verticais, causados por carga hidrológica, com suporte do satélite gravimétrico GRACE, de modelagem hidrológica e de estações permanentes GNSS;
- avaliação dos dados obtidos a partir de receptores GNSS instalado em embarcação para a elaboração de perfis longitudinais dos grandes rios amazônicos;
- comparação dos dados obtidos por receptores GNSS e régua linimétricas com dados altimétricos espaciais adquiridos por parte dos satélites ICESAT, ENVISAT e JASON-2.

A avaliação exitosa mediante o uso de receptores do sistema de posicionamento global (GPS) foram seqüenciados em etapas, a saber: definição dos melhores métodos de processamento de dados GNSS; correção da deformação crustal nos levantamentos geodésicos realizados através da comparação de séries do satélite GRACE e de modelagem hidrológica com estações permanentes GPS existentes na área de influência do estudo; obtenção de altitude dos zeros das estações fluviométricas; obtenção de

perfis da declividade da linha de água e avaliação de dados da tecnologia de altimetria espacial. Na seqüência, apresentam-se, com detalhes, a conclusões da pesquisa.

6.2 Conclusões

Nesta seção, pontuam-se mais objetivamente as seguintes observações para o estudo conduzido.

- O código computacional GINS do CNES/GRGS mostrou-se uma boa solução no tratamento de dados GPS. Ao longo da realização deste trabalho, foram realizados mais de 50 mil processamentos de dados GNSS, comprovando a potencialidade desse código, tão capaz de fácil automatização e com uma vasta possibilidade de configuração e métodos de processamento, como métodos PPP e de dupla diferença, que permitiram uma escolha mais adequada dos resultados.
- O método PPP do código computacional GINS-PC mostrou-se altamente eficiente para o processamento de dados GNSS, fato que permitiu condições de concluir com os seguintes pontos no que concerne à metodologia do processamento de dados GNSS. Através das análises realizadas, o método PPP foi considerado o mais indicado para levantamentos GNSS na bacia Amazônica em função da esparsa rede de estações de referências. A partir de linhas de bases maiores que 28 km de largura, o método apresenta desempenho superior na obtenção de coordenadas verticais se comparado ao método clássico de dupla diferença. O novo método de resolução de ambigüidades inteiras foi capaz de aumentar a precisão dos processamentos GPS do método PPP, com impacto maior nas coordenadas horizontais. Para processamento híbrido de dados GNSS (GPS + GLONASS), houve uma precisão superior nas coordenadas verticais, mostrando que o aumento da constelação de satélites e conseqüente melhora da geometria dos satélites usados no processamento aumentam a precisão do processamento GNSS; essa condição gera expectativa para o processamento híbrido utilizando os sistemas GPS + GLONASS e mais o sistema GALILEO quando o mesmo estiver em um estágio mais operacional.

- A bacia Amazônica é fortemente afetada por efeitos de deformação crustal por carga hidrológica. Assim, nessa bacia, são observadas as maiores amplitudes desse efeito em todo o globo. Com base na análise da série temporal de 18 (dezoito) estações permanentes GPS, pôde-se detectar deslocamentos verticais da crosta da ordem de 10 cm de amplitude. Todavia as convenções do IERS (2010) não definem, em suas recomendações, um modelo que possa corrigir os efeitos de carga hidrológica, e a magnitude desse efeito prejudica a precisão de levantamentos geodésicos e a avaliação da tecnologia de altimetria espacial no nível centimétrico. Foram empreendidos esforços para a modelagem desse fenômeno, analisando a capacidade de séries do satélite GRACE de diferentes centros de análises (CSR, JPL, GFZ e GRGS) e do modelo HYDL para melhor explicá-lo. Nas análises realizadas, observou-se que as séries do GRACE GRGS foram os registros que tiveram o melhor desempenho na correção de carga hidrológica; as séries do GRGS conseguiram atenuar os efeitos da carga hidrológica em todas as 18 estações GNSS testadas e corrigiram até 72% dos impactos desse fenômeno. Não se pode perder de vista que, na avaliação desta tese, empregaram-se as séries de deformação crustal do GRACE (GRGS), o produto mais indicado para correção de carga hidrológica em levantamentos geodésicos. No entanto boa parte do sinal de carga hidrológica não foi capaz de ser corrigido pelos métodos testados em todos locais analisados. Esse fato pode ser atribuído a várias questões, como diferença de fase e amplitude entre os produtos testados e as séries de estações GPS, bem como à diferença de análise entre medições pontuais nas estações e as observações em área do GRACE e do HYDL, sendo a limitação, na resolução espacial, uma das causas. Nesse ponto, apesar do modelo hidrológico HYDL ter uma resolução espacial bem superior às séries do GRACE, note-se que o HYDL apresentou um desempenho inferior na modelagem do fenômeno de carga hidrológica, fato que pode ser explicado pela limitação do modelo HYDL em representar características complexas da hidrologia na bacia Amazônica (exemplo: remanso , armazenamento em várzeas, entre outros aspectos).
- A obtenção de altitude do zero de 62 (sessenta e duas) estações fluviométricas da bacia Amazônica constituiu uma importante etapa na melhoria de qualidade dos dados hidrológicos, o que permite, no futuro, a realização de estudos, tais

como: consistência de dados fluviométricos; modelagem hidrodinâmica; calibração do coeficiente de Manning entre os trechos; avaliação de tecnologias de altimetria espacial de forma mais eficiente. Somente com o uso de referenciais comuns às estações hidrológicas, está garantida, de forma segura, a preservação de séries hidrológicas. Quanto à metodologia de realização de altitude desses zeros, foram realizados dois avanços significativos: o primeiro, a partir dos trabalhos apresentados por ALMEIDA FILHO (2009), que comparou dados de réguas fluviométricas e séries de altura equivalente de água do satélite GRACE; o segundo, referente ao estudo de MOREIRA (2010), que, por sua vez, apresentou boas correlações entre séries de deformação crustal derivadas do GRACE e níveis de réguas fluviométricas. Os dois estudos citados permitiram a obtenção das variações de altitude em função da deformação crustal causada por carga hidrológica das 62 (sessenta e duas) réguas. Através da regressão de dados de régua linimétricas e dados de deformação crustal do satélite GRACE, foi gerada uma equação de zeros dinâmica, utilizando apenas dados de régua, de modo a corrigir a deformação crustal causada por carga hidrológica. A proposição dessa equação ajuda e simplifica a comparação de dados de régua com dados de altimetria espacial com objetivo de estabelecer comparação mais precisa entre essas duas fontes de dados. O segundo avanço está na comparação entre os levantamentos obtidos por ponto fixo e pelo GPS cinemático, que permitiram validar a altitude dos zeros de réguas utilizando apenas o receptor a bordo do barco. Possibilita-se, assim, a redução de custos operacionais das campanhas realizadas, já que a simples passagem do barco pela estação pode ser suficiente para obter o zero da régua de estações que, devido a limitações logísticas, não podem ser ocupadas com receptores GNSS. Cada passagem de barco com um receptor GNSS representa uma possibilidade de obter um novo valor de altitude do zero das réguas, que, ao ser comparado com os valores anteriormente obtidos, pode indicar inconsistências em dados fluviométricos gerados pela estação, o que permite usar essa técnica como indicadores de consistência em dados hidrológicos.

- Os dados cinemáticos adquiridos a partir de receptores GNSS instalados a bordo dos barcos permitiram obter perfis longitudinais em uma escala inédita dos rios amazônicos. Esses perfis possibilitaram descrever a variação de altura e de

declividade com extremo grau de precisão. Antes, essa informação estava restrita a dados pontuais observados a partir de estações fluviométricas, sendo os mesmos interpolados linearmente com base em longas distâncias, entre estações fluviométricas. Os dados cinemáticos processados a partir de receptores GNSS foram limitados e filtrados em uma escala de segurança de 25 km de resolução espacial de modo a garantir a eliminação de erros aleatórios nas alturas obtidas. No entanto, apesar da filtragem, a resolução espacial apresentada é pelo menos 10 vezes superior às informações geradas pelas réguas linimétricas. A resolução de 25 km foi escolhida baseando-se na baixa declividade encontrada em alguns trechos dos rios amazônicos, nos erros inerentes ao processamento GNSS e em função de movimentos de atitude do barco, que causam variações na altura de antena em relação à superfície de água.

- A partir dos dados de nível de réguas referenciados ao geóide através do modelo do geopotencial EGM08, da deformação crustal e da declividade dos rios amazônicos, os dados de altimetria espacial puderam ser comparados com maior precisão. O cruzamento dessas três fontes de dados permitiu uma melhor comparação do satélite altímetro ICESAT, pois, devido à característica de deriva nas órbitas desse satélite, poucos estudos existem na avaliação de dados desse satélite em contraste com os dados de réguas fluviométricas. Essa limitação justifica-se pela falta de dados de declividade entre cada diferente ponto de passagem desse satélite e a régua linimétrica. No único estudo encontrado, apresentado por HALL *et al.* (2001), foram identificados erros de 70 cm gerados pela estimativa incorreta da declividade. No presente estudo, com melhores estimativas de declividade a partir de receptores GNSS, os dados do ICESAT puderam ser avaliados em 445 pontos, obtendo 9 cm de precisão média na obtenção de dados hidrológicos. O conjunto de dados aqui apresentado também serviu na avaliação de erros sistemáticos dos satélites altímetros ENVISAT e JASON-2 que foram publicados nos estudos desenvolvidos por CALMANT *et al.* (2013) e SEYLER *et al.* (2013).
- A comparação de dados dos perfis GNSS, réguas linimétricas e dados de altimetria demonstraram a qualidade dos dados de altimetria espacial, conforme estudos anteriormente realizados, o que indica a grande aplicação dessa

tecnologia no monitoramento, de forma a se obter informações hidrológicas em locais não monitorados e aumentando o nível de consistência em locais onde já são realizados monitoramento convencional.

Para a conclusão final do texto apresentado, uma importante questão que deve ser abordada trata-se do fato de que a baixa qualidade encontrada nas séries fluviométricas geradas por estações convencionais na bacia Amazônica resulta em um risco e imprecisões significativas no desenvolvimento de vários estudos a serem realizados nessa bacia, conforme apresentado no trabalho em colaboração com este estudo em SILVA *et al.* (2014). Estudos como modelagem hidrológico-hidrodinâmica e estudos na avaliação de tecnologias de altimetria espacial são altamente dependentes da qualidade desses dados. Em alguns casos, como já mencionados anteriormente, esse tipo de informação é usada como o que convencionalmente denomina-se de verdade terrestre para calibração e validação de aplicações desenvolvidas. Nesse sentido, foram realizados esforços, durante a execução deste estudo, para um investimento maior na qualidade de obtenção de dados fluviométricos de estações convencionais. Alguns procedimentos já estão sendo adotados desde o estudo de MOREIRA (2010), onde se destaca a necessidade de construção de estrutura física adequada às estações fluviométricas, com objetivo de dar maior estabilidade aos lances de régua e qualidade aos dados obtidos em face às condições de instabilidade do solo amazônico.

6.3 Recomendações

Para o futuro, como continuidade deste trabalho, recomendam-se algumas ações como expostas a seguir.

- Os dados apresentados nesta tese e todos dados geodésicos, ao serem aplicados em hidrologia, necessitam ser reduzidos ao geóide. Durante a realização dos estudos da tese, foram analisados diferentes modelos do geopotencial, sendo encontradas diferenças entre eles. Contudo, por falta de ferramentas apropriadas de análise, uma vez que todos os modelos representaram, de forma lógica, questões hidrodinâmicas, escolheu-se, como

modelo do geopotencial, o EGM08, seguindo as recomendações das convenções do IERS (2010). Como todos os dados geodésicos, incluindo os produzidos neste estudo, tem, na origem, o elipsóide de revolução, recomenda-se que futuros estudos possam buscar procedimentos de melhor avaliação dos modelos do geopotencial existentes, de forma a reduzir dados geodésicos ao geóide que melhor represente a hidrologia da bacia.

- Da mesma forma, é esperada uma contínua evolução dos métodos de processamento GNSS, melhoria nos métodos de estimativas de ambigüidades no PPP, melhoria nos modelos de correção de efeitos geofísicos e de observação. Portanto, os resultados aqui apresentados podem ser reprocessados e melhorados a partir do avanço do estado da arte da metodologia empregada nesta tese.
- Em adição aos erros de processamento citados acima, erros na medição de alturas de antena e erros devidos à variação dessa altura de antena por movimentos do barco (exemplo: ondas, variações de velocidade, variações no calado causadas por gasto de combustível, entre outros elementos) limitaram a resolução espacial dos perfis cinemáticos em 25 km de resolução espacial. Espera-se e recomenda-se que novos levantamentos busquem métodos de maior controle dessas variações e medições de altura de antena que, adicionadas ao aprimoramento dos métodos de processamento, ajudem a melhorar a resolução espacial obtida para esses dados.
- Os modelos propostos de correção de deformação crustal apresentaram apenas valores parciais de correção de carga hidrológica. O modelo HYDL, apesar de ter uma resolução superior, apresentou resultados piores se comparados com os dados do satélite GRACE, recomendando-se, portanto, a elaboração de modelos hidrológicos mais complexos, baseados em dados de campo que possam melhor representar esse fenômeno que impacta, de forma significativa, os levantamentos geodésicos realizados na bacia Amazônica. Adicionalmente, espera-se que novas versões do satélite GRACE, com melhores resoluções espaciais, ajudem a reduzir as inconsistências encontradas nas séries de deformação crustal apresentadas neste estudo.
- Dados de régua, perfis obtidos por receptores GNSS e dados de altimetria espacial permitem representar variações dos rios em diferentes escalas

espaciais e temporais. Um próximo passo seria o desenvolvimento de uma metodologia de melhor integração entre essas diversas fontes de informação com vistas a uma melhor compreensão das variações espaço-temporais da hidrodinâmica dos rios amazônicos. Em relação aos perfis longitudinais de altimetria espacial apresentados, obtidos a partir de dados de estações virtuais geradas pelo RHASA (Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia) Universidade Estadual da Amazônia (UEA), entende-se que, assim como no procedimento realizado em perfis gerados por dados de receptores GNSS, pode-se buscar alternativas de filtrar espacialmente dados de altimetria satelital de forma a permitir a compatibilização entre precisão do dado altimétrico e a correspondente resolução espacial, garantindo uma maior confiabilidade na informação a ser gerada.

- Dados de altimetria espacial, quando aliados a boas práticas, podem e devem ser usados em complemento a informações geradas pela rede hidrometeorológica nacional brasileira. Nessa condição, torna-se possível densificar a informação hidrológica em regiões com impossibilidade ou precariedade de monitoramento, gerar novas informações, como, por exemplo, obtenção da altitude do zero de estações fluviométricas, e auxiliar a realização de consistências das informações hidrológicas de estações convencionais.
- Espera-se e recomenda-se a emprego dos dados apresentados nesta tese em estudos hidráulicos, hidrodinâmicos, hidrológicos e na obtenção de variáveis hidrológicas e relações, como curva-chave, ou ainda parametrizações físicas para o escoamento, como o coeficiente de Manning, entre outras potenciais aplicações.
- Os resultados deste estudo foram gerados, principalmente, a partir de informações coletadas em trabalho de campo. O trabalho de campo é uma atividade fundamental no monitoramento hidrológico e na avaliação de tecnologias geodésicas. Portanto, recomenda-se a instalação de novas estações permanentes GPS e hidrológicas e o aprimoramento da qualidade nos dados produzidos e coletados pelas estações já existentes na esparsa rede de monitoramento amazônico, com o objetivo de melhor avaliar os diferentes fenômenos que causam deformação da crosta terrestre e auxiliar a

avaliação de tecnologias tão importantes como a altimetria espacial e dados dos satélites GRACE.

Por fim espera-se que o grande conjunto de dados e as análises hidrológicas geradas neste estudo de tese, como perfis longitudinais, níveis de réguas fluviométricas referenciados ao geóide através do da utilização de dados GNSS e emprego do modelo do geopotencial EGM08, validação de técnicas de altimetria espacial de missões já existentes e correções de deformação crustal, possam contribuir na avaliação do desempenho de missões espaciais futuras, a exemplo da missão espacial SENTINEL-3 da ESA (Agência Espacial Européia, com o primeiro lançamento previsto em 2016) e a missão SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) da NASA/CNES, que tem seu lançamento previsto para o ano de 2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. R. 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.

ALMEIDA FILHO, F.G.V (2009): Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE, Aplicação na Bacia Amazônica , São Paulo. Tese de D.Sc., EP/USP, São Paulo, SP, Brasil.

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.

ALTAMIMI, Z., L. MÉTIVIER, AND X. COLLILIEUX (2012): ITRF2008 plate motion model, J. Geophys. Res., 117, B07402, doi:10.1029/2011JB008930.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. A. Continuous catchment-scale erosion model. In: BOARDMAN, J.; FAVIS-MORTLOCK, D. (1995): Modelling soil erosion by water, Oxford. Publisher Springer, pp. 413 - 428.

BEVEN, K.J., CLOKE, H.L. (2012): Comment on Hyperresolution global land surface modeling : meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water, Water Resources Research Vol. 48, W01801, 1-3.

BEVIS, M., S. BUSINGER, T. A. HERRING, C. ROCKEN, R. A. ANTHES, and R. H. WARE (1992): GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, J. Geophys. Res., 97(D14), 15787–15801, doi:10.1029/92JD01517.

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.

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; Paciléo Netto, Nicola; Fonseca Júnior, Edvaldo Simões, eds. *Informações espaciais II : notas de aulas*. São Paulo. Parte 2, p.21-30.

BLITZKOW, D.; PACINO, M.C.; MATOS, A.C.O.C. (2008): Activities in south America: Gravity and Geoid Projects. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/34_Activities_in_South_America_Gravity_and_Geoid_Pacino_Blitzkow.pdf

BLITZKOW, D ; DE MATOS, ACOC G; DO NASCIMENTO GUIMARÃES; COSTA, SMA (2011). O conceito atual dos referenciais usados em Geodesia. *Revista Brasileira de Cartografia*, N 0 63/5, p. 633-648, 2011

BOEHM, J., WERL, B., SCHUH, H. (2005): Troposphere Mapping Functions For Gps And Very Long Baseline Interferometry From European Center For Medium-Range Weather Forecasts Operational Analysis Data, *J.GEOPHYS. RES.* 111, B02406, [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1029/2005JB003629](http://dx.doi.org/10.1029/2005JB003629).

BOEHM, J., NIELL, A., TREGONING, P., ET AL. (2006): GLOBAL MAPPING FUNCTION(GMF): A New Empirical Mapping Function Based On Numerical Weather Model Data, *GEOPHYS. RES. LETT.* 33, L07304, [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1029/2005GL025546](http://dx.doi.org/10.1029/2005GL025546).

BOEHM, J., HEINKELMANN, R., SCHUH, H. (2007): Short Note: A Global Model Of pressure And Temperature For Geodetic Applications, *J. GEOD.* 81 (10), 679–683, [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1007/S00190-007-0135-3](http://dx.doi.org/10.1007/S00190-007-0135-3).

BONNEFOND, P., EXERTIER, P., LAURAIN, O., et al. (2003): Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/Poseidon altimeters in Corsica. *Mar. Geod.* 26 (3–4), 261–284, <http://dx.doi.org/10.1080/714044521>.

BONNEFOND, P., EXERTIER, P., LAURAIN, O., et al. (2003) : Levelling sea surface using a GPS-Catamaran. *Mar. Geod.* 26 (3–4), 319–334, <http://dx.doi.org/10.1080/714044524>.

BONNEFOND, P., EXERTIER, P., LAURAIN, O., et al. (2010) : Absolute calibration of Jason-1 and Jason-2 altimeters in Corsica during the formation flight phase. *Mar. Geod.* 33 (S1), 80–90, <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2010.487790>.

BONNEFOND, P., HAINES, B., WATSON, C.S. (2010B): In situ absolute calibration and validation – a link from open-ocean to coastal altimetry. In: *Coastal Altimetry*, Vignudelli, S., Kostianoy, A.G., Cipollini, P., Benveniste J.(eds.), Chapter 11, Springer, ISBN: 978-3-642-12795-3, p. 566.

BOUIN, M.N., BALLU, V., CALMANT, S., et al. (2009A) : A kinematic GPS methodology for sea surface mapping, Vanuatu, *J. Geod.* 83 (12), 1203–1217, <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-009-0338-x>.

BOUIN, M.N., BALLU, V., CALMANT, S., et al. (2009B) : Improving resolution and precision of mean sea surface from kinematic GPS, Vanuatu subduction zone. *J. Geod.* 84 (1), 65–77, <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-009-0320-7>.

BRUTSAERT, W. (1986): Catchment-scale evaporation and the atmospheric boundary layer, *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 39S-45S

BURGES, S.J. (1986): Trends and directions in hydrology, *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 1S-5S

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.; SILVA, J. S. ; MOREIRA, D. M. ; SEYLER, F. ; SHUM, C. K ; CRETAUX, J. F.; GABALDA, G. (2013): Detection of ENVISAT RA2/ICE-1 Retracked Radar Altimetry Bias Over Rivers using GPS, *Advances in Space Research*, v. 51, p. 1551-1564.

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.

CAMPOS, I. O (2004): Referencial altimétrico para a bacia do Rio Amazonas/I.O.Campos – Ed. Rev.- São Paulo, 2004 – 128 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes

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.

CHENG, M., AND B. D. TAPLEY (2004): Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years, *J. Geophys. Res.*,109,B09402, doi:10.1029/2004JB003028.

CRETAUX, J. F., S. CALMANT, V. ROMANOVSKI, F. PEROSANZ, S. TASHBAEVA, P. BONNEFOND, D. MOREIRA, C. K. SHUM, F. NINO, M. BERGÉ-NGUYEN, S. FLEURY, P. GEGOUT, R. ABARCA DEL RIO, P. MAISONGRANDE (2011): Absolute Calibration of Jason Radar Altimeters from GPS Kinematic Campaigns Over lake Issykkul, *Marine Geodesy*, doi: 10.1080/01490419.2011.585110.

DALAZOANA, R. (2005): Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileira, Tese de Doutorado, CPGCG, UFPR, 188pp

DARWIN, G.H. (1882): 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/

DAVIS, J. L., P. ELOSEGUI, J. X. MITROVICA, AND M. E. TAMISEA (2004): Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24605, doi:10.1029/2004GL021435.

DAWDY, D.R. (1986): Modeling alluvial channels. Water Resources Research Vol. 22, No. 9, 71S-81S.

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.

DIAS, F. S. (2014): DEFINIÇÃO DE REDE ADAPTATIVA DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO COM SUPORTE DE SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO DOIS RIOS – RJ, MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, UFRJ, BRASIL, 2014.

DILL, R. (2008): HYDROLOGICAL MODEL LSDM FOR OPERATIONAL EARTH ROTATION AND GRAVITY FIELD VARIATIONS. SCIENTIFIC TECHNICAL REPORT 08/09. DOI: 11.2312/GFZ.B103-08095 DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ.

DILL, R. AND H. DOBSLAW (2013): Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations, J. Geophys. Res. Solid earth 118, doi:10.1002/jgrb.50353.

DOOGE, J.C.I. (1986): Looking for hydrologic laws. Water Resources Research Vol. 22, No. 9, 46S-58S.

DOOGE, J.C.I (1997): Scale problems in hydrology. In: Reflections on Hydrology , American Geophysical Union, 314 pp.

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.

DRAPER, N.,R, e SMITH, H, (1981): Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons, 709 pp.

- DZIEWONSKI, A. M., e D. L. ANDERSON (1981): Preliminary Reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, pp. 297-356.
- EAGLESON, P.S. (1986): The emergence of global-scale hydrology. *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 6S-14S
- EAGLESON, P.S. (1997): The emergence of global-scale hydrology. In: *Reflections on Hydrology*, American Geophysical Union, 314 pp.
- ENTEKHABI, D. ASRAR, G.R., BETTS, A.K., BEVEN, K.J., BRAS, R.L., DUFFY, C.J., DUNNE, T., KOSTER, R.D., LETTENMAIER, D.P., MCLAUGHLIN, D.B. SHUTTLEWORTH, W.J., VAN GENUCHTEN, M.T., WEI, M-Y, WOOD, E.F.(1999): An agenda for land surface hydrology research and a call for the second international decade. *Bulletin of the American Meteorological Society* Vol. 80, No. 10, 2043-2058.
- EPA (2000): BASINS Technical Note 6: Estimating Hydrology and Hydraulic Parameters for HSPF. EPA, July 2000.
- FARRELL, W. E., (1972): Deformation of the Earth by Surface Loads, *Rev. Geophys. Space Phys.*,10, pp. 761–797.
- FREITAS, S.R.C.; BLITZKOW, D.(1999): Altitudes e geopotencial. *IGeS Bulletin – Special Issue for SouthAmerica*, 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.
- FÖRSTE et al., (2014): EIGEN-6C4 – The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 . Disponível em <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/Foerste-et-al-EIGEN-6C4.pdf>.
- FUND, F., PEROSANZ, F., TESTU, L., LOYER, S.(2012): An Integer Precise Point Positioning Technique for Sea Surface Observations Using a GPS Buoy, *Advances in Space Research*.
- GEMAEL, C.(1999): *Introdução à Geodésia Física*. Curitiba: UFPR.

GETIRANA, A.C. (2009): Contribuições da Altimetria Espacial à Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias na Amazônia . Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GETIRANA, A. C. V. ; ROTUNNO FILHO, O. C. ; BONNET, M-P ; MANSUR, W. J. ; 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.

GONTIJO JR, W. C. (2007): Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2007.

GUYOT, J.L. (1993): Hydrogéochimie dès Fluves de L'Amazonie Bolivienne . 1 ed.,Paris, ORSTOM.

GUYOT, J.L., CALLÉDE, J., COCHONNEAU, G. et al. (1999) : Caractéristiques Hydrologiques du Bassin Amazonien, In:Anais de Manaus' 99 - Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins , CD ROM, Manaus, Brasil, 16-19 Novembro.

HALL, A.C., SCHUMANN, G. J.-P., BAMBER, J.L., BATES, P.D. AND TRIGG, M.A. (2011): Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry." Water Resources Research, 48, paper W06602. (10.1029/2011WR010895).

HEISKANEN, W.A. AND H. MORITZ, (1967): Physical Geodesy, W.H. Freeman and Co., SanFrancisco.

HÉROUX, P. AND J. KOUBA (1995): GPS Precise Point Positioning with a Difference., Presented at Geomatics 1995, Ottawa, Ontario, Canada, 13-15 June.

HOFMANN-WELLENHOF,B., , MORITZ, H. (2005): Physical Geodesy, 1a. edição, SpringerVerlag, 2005.

KLEMES, V. (1974): The Hurst phenomenon : a puzzle ? Water Resources Research Vol. 10, No. 4, 675-688

KLEMES, V. (1983): Conceptualization and scale in hydrology *Journal of Hydrology* 65 , 1-23

KLEMES, V. (1986): Dilettantism in hydrology : transition or destiny ? *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 177S-188S

KLEMES, V (1997): Water storage: source of inspiration and desperation. In: *Reflections on Hydrology* , American Geophysical Union, 314 pp.

KOSUTH, P., D. BLITZKOW, AND G. COCHONNEAU (2006): Establishment of analtimetric reference network over the Amazon Basin using satellite radar altimetry (Topex Poseidon), paper presented at 15 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium, ESA, Venice, Italy.

LARSON, K. M., E. E. SMALL, E. D. GUTMANN, A. L.BILICH, J. J. BRAUN, and V. U. ZAVOROTNY (2008): Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24405, doi:10.1029/2008GL036013.

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.

LESCARMONTIER L, B. LEGRESY, R. COLEMAN, F. PEROSANZ, C. MAYET, L. TESTUT (2012): Vibrations of the Mertz glacier ice tongue, *J. Glaciology*, in press.

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.

LINSLEY, R.K. (1986): Flood estimates: how good are they? *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 159S-164S

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*.

LOYER, S., F. PEROSANZ, F. MERCIER, H. CAPDEVILLE, AND J. C. MARTY (2012) : Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center. *Journal of Geodesy* 86(11): 991-1003.

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.

MARTY, J.C. (2009): GINS Algorithmic Documentation, v5, July 2009 (in French), www.igsac-cnes.cls.fr/documents/gins/GINS_Doc_Algo.html

MARTY, J.C., S. LOYER, , F. PEROSANZ, , F. MERCIER, G. BRACHER, B. LEGRESY, L. PORTIER, H. CAPDEVILLE, F. FUND, J.M. LEMOINE, R. BIANCALE (2011): GINS: the CNES/GRGS GPS scientific software, 3rd International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, In: ESA Proceedings WPP326, 31 August–2 September 2011, Copenhagen, Denmark.

MELACHROINOS .S (2007): Positionnement Geodesique a Haute Frequence De Reseaux Gns Terrestres Et Marins, PHD Thesis.

MOLINARI, B. S. (2014): Modelagem espacial da qualidade de água na bacia do rio Piabanha/RJ, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2014.

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

MOREIRA, D.M (2010): Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2010.

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

PAVLIS, N. K., S. A. HOLMES, S. C. KENYON, and J. K. FACTOR (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *J. Geophys. Res.* , 117 , B04406, doi:10.1029/2011JB008916.

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, MARTY JC, BALMINO G (1997): Dynamic orbit determination and gravity field model improvement from GPS. DORIS and laser measurements on TOPEX/Poseidon satellite. *J Geod* 71:160–170.

PEROSANZ,F.(2002): GPS pour la géodesie : la mesure géométrique in BIANCALE, R. 1ère Ecole d'Été 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.

PETIT.G e LUZUM.B, IERS (2010) : IERS Conventions, (eds.), IERS Technical Note n. 36, 179 pp., 2010.

PILGRIM, D.H. (1986): Bridging the gap between flood research and design practice. *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 165-176S.

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, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.

REAGER, J. T. , A. S. GARDNER , J. S. FAMIGLIETTI, D. N. WIESE, A. EICKER, , M.-H. LO (2016): A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology. *Science*, DOI: 10.1126/science.aad8386.

RIBEIRO NETO, A (2006): Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira [Rio de Janeiro] 2006. XVII, 178 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2006) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1997): Reflections of the 3-dimensional structure of river basins : its linkage with runoff production and minimum energy dissipation In: Reflections on Hydrology , American Geophysical Union, 314 pp.

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>.

SAASTAMOINEN, J. (1973): Contributions to the theory of atmospheric refraction. Bull. Geodesique 107, 13–34, 1973.

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.

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. ; SILVA, J. S. ; MOREIRA, D. M. ; MERCIER, F ; SHUM, C. K.(2013): From Topex/Poseidon to Jason2 - OSTM in the Amazon basin. Advances in Space Research, v. 51, p. 1542-1550, 2013.

SILVA, A. E. S. (2011): Estimativa das precisões absoluta e relativa de níveis de água fluviais obtidos do satélite altimétrico JASON-2 em bacias hidrográficas brasileiras, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2011.

SILVA, J S DA (2010): Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia Amazônica Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2010.

SILVA, J. S. ; SEYLER, F. ; CALMANT, S. ; Rotunno Filho, O. C. ; ROUX, E. ; ARAUJO, A. A. M. ; GOYOT, J. (2012): Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry. *International Journal of Remote Sensing* (Online), v. 33, p. 3323-3353, 2012.

SILVA, JOECILA SANTOS ; CALMANT, STÉPHANE ; SEYLER, FRÉDÉRIQUE ; MOREIRA, DANIEL MEDEIROS ; OLIVEIRA, DANIEL ; MONTEIRO, ACHILES (2014): Radar Altimetry Aids Managing Gauge Networks. *Water Resources Management*, v. 28, p. 385-400, 2014.

SOUZA, V. A. S. (2015): Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – Bacia do rio Machadinho/RO, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2015.

SPOSITO, G. (1986): The physics of soil water physics, *Water Resources Research* Vol. 22, No. 9, 83S-88S.

STECKLER, M. S., S. L. NOONER, S. H. AKHTER, S. K. CHOWDHURY, S. BETTADPUR, L. SEEBER, AND M. G. KOGAN (2010): Modeling Earth deformation from monsoonal flooding in Bangladesh using hydrographic, GPS, and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data, *J. Geophys. Res.*, 115, B08407, doi:10.1029/2009JB007018.

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.

TESMER, V., P. STEIGENBERGER, T. VANDAM, AND T. MAYER-GÜRR (2011): Vertical deformations from homogeneously processed GRACE and global GPS long-term series, *J. Geod.*, 85, 291–310, doi:10.1007/s00190-010-0437-8.

TORGE, W. (2011): *Geodesy*, 3a. edição, Walter de Gruyter GmbH & Co, 2001.

TREGONING, P., C. WATSON, G. RAMILLIEN, H. MCQUEEN, AND J. ZHANG (2009): Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15401, doi:10.1029/2009GL038718.

UNESCO (1974): Recommendation on the Status of Scientific Researchers. Paris, France.

UNESCO (1972): Convention for the Protection of the World Cultural and Natural Heritage. Paris France.

VALS TOOL (2009): Virtual ALtimetry Station. Version 0.5.7. August 2009. Acessado em http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php. Acesso em 20/04/2015

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. Lett.*, 28(4), 651–654.

VAN DAM, T., J. WAHR, AND D. LAVALLÉE (2007): A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe, *J. Geophys. Res.*, 112, B03404, doi:10.1029/2006JB004335.

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.

WAHR, J., MOLENAAR, M., BRYAN, F. (1998): Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *Journal of Geophysical Research* , v. 103, n. B12, pp. 30205–30229, 1998.

WATSON, C.S., COLEMAN, R., WHITE, N., et al. (2003): Absolute calibration of TOPEX/Poseidon and Jason-1 using GPS buoys in Bass Strait, Australia. *Mar. Geod.* 26 (3–4), 285–304, <http://dx.doi.org/10.1080/714044522>, 2003.

WATSON, C.S., WHITE, N., COLEMAN, R., et al. (2004): TOPEX/Poseidon and Jason-1: Absolute calibration in Bass Strait, Australia, *Mar. Geod.* 27 (1–2), 107–131, <http://dx.doi.org/10.1080/01490410490465373>, 2004.

WATSON, C.S., BURGETTE, R., TREGONING, P., et al. (2010): Twentieth century constraints on sea level change and earthquake deformation at Macquarie Island, *Geophys. J. Int.* 182 (2), 781–796, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04640.x>, 2010.

WATSON, C., WHITE, N., CHURCH, J., et al. (2011): Absolute Calibration in Bass Strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2, *Mar. Geod.* 34 (3–4), 242–260, <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2011.584834>, 2011.

WEINBACH, U., SCHON, S. (2011): GNSS receiver clock modeling when using high precision oscillators and its impact on PPP, *Adv. Space Res.* 47 (2), 229–238, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.031>, 2011.

WUBBENA G. (1985): Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements, in: Goad C. (eds.) *Proceedings of 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system*. US Department of Commerce, Rockville, Maryland, USA, 403–412, 1985.

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.

WOOD, E.F, ROUNDY, J.K., TROY, T.J., VAN BEEK, L.P.H, BIERKENS, M.F.P., BLYTH, E. ROO, A. , DOLL, P, EK, M., FAMIGLIETTI, J. , GOCHIS, D., VAN DE GIESEN, N., HOUSER, P., JAFFÉ, P.R., KOLLET, S., LEHNER, B., LETTENMAIER, D.P., PETERS-LIDAR, C., SIVAPALAN, M., SHEFFIELD, J.,

WADE, A., WHITEHEAD, P. (2011): Hyperresolution global land surface modeling : meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resources Research* Vol. 47, W05301, 1-10

WOOD, E.F, ROUNDY, J.K., TROY, T.J., VAN BEEK, L.P.H, BIERKENS, M.F.P., BLYTH, E. ROO, A. , DOLL, P, EK, M., FAMIGLIETTI, J. , GOCHIS, D., VAN DE GIESEN, N., HOUSER, P., JAFFÉ, P.R., KOLLET, S., LEHNER, B., LETTENMAIER, D.P., PETERS-LIDAR, C., SIVAPALAN, M., SHEFFIELD, J., WADE, A., WHITEHEAD, P. (2012): Reply to comment by Keith J. Beven and Hannah L. Cloke on Hyperresolution global land surface modeling : meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resources Research* Vol. 48, W01802, 1-3

WU, X., M. B. HEFLIN, E. R. IVINS, AND I. FUKUMORI (2006): Seasonal and interannual global surface mass variations from multisatellite geodetic data, *J. Geophys. Res.*, 111, B09401, doi:10.1029/2005JB004100.

XAVIER, L. N. R. ; BECKER, M. ; CAZENAVE, A. ; LONGUEVERGNE, L. ; LLOVEL, W. ; FILHO, O.C. ROTUNNO (2010): Interannual variability in water storage over 2003 2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, p. 1629-1637, 2010.

XAVIER, L. N. R (2012): Modelagem Hidrológica com Aporte de Dados da Missão Espacial Grace: Aplicação a Bacias Brasileiras, Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil, 2012.

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

ZHENG, D.W., ZHONG, P., DING, X.L., ET AL. (2005): Filtering Gps Time-Series Using A Vondrak Filter And Cross-Validation, *J. GEOD.*, 79(6-7), 363-369, DOI:10.1007/S00190-005-0474-X, 2005.

ZUMBERGE, J.F., M.B. HEFLIN, D.C. JEFFERSON, M. WATKINS AND F.H. WEBB (1997): Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.* 102, B03, <http://dx.doi.org/10.1029/96JB03860>.

ANEXO A

RÉSUMÉ ÉTENDU

Cette thèse de doctorat traite de l'apport des technologies de géodésie spatiale à la surveillance hydrologique du bassin Amazonien. La géodésie se définit comme la science qui étudie la forme, les dimensions et la rotation de la Terre. Cette science se fonde sur la localisation des objets et la mesure du champ gravitationnel terrestre. Le terme géodésie spatiale fait référence à l'emploi des satellites artificiels. L'intérêt des données de géodésie spatiale est d'apporter de nouvelles contributions dans le domaine de l'hydrologie en palliant au manque d'information, en améliorant la fiabilité des informations déjà existantes et en réduisant ainsi les coûts financiers et les délais associés à la surveillance de régions complexes comme le bassin Amazonien.

Cette étude évalue les données hydrologiques fournies par les réseaux de surveillance conventionnels, du point de vue quantitatif et qualitatif ainsi qu'en termes de coût de fonctionnement des réseaux d'observation et de disponibilité des données. Actuellement le réseau de surveillance brésilien est quatre fois moins dense que celui des États-Unis d'Amérique par exemple. De plus la distribution géographique du réseau conventionnel brésilien dans le bassin de l'Amazone n'est pas satisfaisante selon l'Organisation Météorologique Mondiale (World Meteorological Organization - WMO) (WMO, 1994). Cette carence de données hydrologiques s'explique en partie par la difficulté et le coût élevé d'accès à la région, du fait des grandes distances à parcourir, de l'absence d'un réseau routier adéquat et la nécessité dans de nombreux cas d'utiliser le transport fluvial ou même l'avion. Le manque de données hydrologiques in situ fait aussi défaut à des activités d'ingénierie comme, par exemple, l'installation de systèmes d'alerte de crues ou la réalisation d'études du potentiel hydroélectrique de certains sous-bassins.

La possibilité d'intégrer aux données conventionnelles des données de géodésie spatiale est une opportunité pour améliorer la connaissance hydrologique sur la région amazonienne à faible coût car une grande partie des données générées par les missions spatiales est disponible sur les sites d'Internet. Cependant, il est essentiel de maîtriser l'utilisation et de quantifier les incertitudes de ces nouvelles données. L'utilisateur de ces technologies doit être conscient des erreurs et des limites des données de géodésie spatiale pour l'hydrologie notamment en termes de précision et de résolution

spatiotemporelle. Si la compatibilité entre ces données n'est pas assurée, des erreurs peuvent se propager et affecter la fiabilité du résultat.

La question de l'applicabilité des données de géodésie spatiale à l'étude scientifique du bassin amazonien, a fait l'objet de différents travaux à travers l'échange technico-scientifique entre le *Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil* - COPPE, et l'Université Federale de Rio de Janeiro – UFRJ et l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, thèses soutenues par GETIRANA (2009), SILVA (2010), XAVIER (2012). Ces études antérieures ont permis d'évaluer l'apport des données géodésiques au travers de modélisations hydrologiques, de comparaisons aux mesures *in situ* des règles limnimétriques et de comparaison aux données issues de différentes sources.

Cette thèse se situe dans la continuité de ces études et du travail présenté par MOREIRA (2010) sur l'utilisation des données GNSS (Global Navigation Satellite System). Ainsi, les objectifs suivants ont été définis:

- Réalisation du rattachement au même système de référence altimétrique global des stations limnimétriques conventionnelles dans la région Amazonienne avec une précision centimétrique par nivellement GNSS;
- Etude des mouvements verticaux provoqués par la charge crustale hydrologique, à partir des comparaisons des séries générées par le satellite gravimétrique GRACE, d'un modèle hydrologique et de séries de coordonnées de stations permanentes GNSS dans le bassin Amazonien ;
- Exploitation des données des récepteurs GNSS installés à bord des bateaux pour les levés de campagnes de mesures, afin de réaliser de profils longitudinaux des principaux affluents de l'Amazone et l'utilisation de ces profils pour la mise en référence « cinématique » des stations limnimétriques;
- Comparaison des données obtenues par les récepteurs GNSS et les règles limnimétriques nivelées avec des données provenant d'autres techniques de géodésie spatiale et en particulier d'altimétrie spatiale avec les satellites ICESAT, ENVISAT et JASON-2.

Ce travail académique se focalise sur le bassin de l'Amazone et les sous-bassins des rivières Negro, Solimões et Madèra. Les campagnes de mesures ont été réalisées dans le cadre du Projet *Dynamique Fluviale* dans le Bassin Amazonien. Ce projet est le fruit d'une coopération entre la *Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais* - CPRM,

du Ministère des Mines et Energie du Brésil, et l'Institut de Recherche Pour le Développement - IRD, organe du gouvernement français, pour améliorer la connaissance du comportement hydrodynamique et hydrologique du bassin de l'Amazonie notamment par la surveillance hydrologique spatiale et les techniques de télédétection.

Nous utilisons également les données collectées par les récepteurs GNSS de la *Companhia de Pesquisa de Recurso Minerais* – CPRM, installés dans le cadre des campagnes de mesures de L'observatoire de recherche en environnement : Contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazonie - ORE- HYBAM. De plus, dans le cadre du Réseau Hydrométéorologique National brésilien surveillé par la CPRM et géré par Agência Nacional de Águas – ANA, du Ministère de l'Environnement do Brésil, des campagnes de mesures ont été menées par la CPRM et exploitées pour cette étude. Enfin, les données des stations GNSS du Réseau de Surveillance Continu – RBMC, de l'Institut brésilien de géographie et de statistiques – IBGE, ont été utilisées et ont également contribué à l'évaluation des méthodes de traitement GNSS.

L'utilisation de récepteurs GNSS permet de déterminer une référence altimétrique commune aux différentes techniques de géodésie spatiale et représente le point-clé de ce travail de thèse. Le logiciel Géodésie par Integrations Numériques Simultanées – GINS a été utilisé pour le traitement des données GNSS. Ce logiciel est développé depuis les années 70 par le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale – GRGS, du Centre National d'Études Spatiales - CNES .

Nous avons collecté et traité trois types de données GNSS : les données des stations permanentes, les données de campagnes sur les stations limnimétriques et les données cinématiques à bord des bateaux. Différentes stratégies de traitement de ces trois types de données ont été examinées en tenant compte de critères comme la faible densité de stations de référence GNSS ou le temps nécessaire aux levés. En Amazonie, la méthode de traitement PPP (*Precise Point Positioning*) apparaît comme une alternative intéressante à la technique du positionnement différentiel. Nous l'avons évalué ainsi que deux évolutions récentes disponibles avec le logiciel GINS :

- la résolution des ambiguïtés entières des mesures de phase GPS (LOYER et al , 2012) ;

- Le traitement hybride des constellations (GLONASS+GPS).

Au cours de nos analyses la méthode PPP a montré de meilleurs résultats que les techniques classiques de traitement comme, la méthode de double différence de phases, pour les lignes de base supérieure à 28 km. Ainsi la méthode PPP est la plus appropriée pour les régions où les stations de référence GNSS sont rares, comme c'est le cas du bassin Amazonien.

La méthode PPP a également été performante pour l'évaluation des mouvements de déformation de la croûte terrestre causés par le cycle hydrologique du bassin de l'Amazonie. Cette technique a permis de calculer avec une précision de quelques millimètres sans stations de référence, les coordonnées de 18 (dix-huit) stations GNSS permanentes dans le bassin Amazonien. Des déplacements verticaux de la croûte terrestre jusqu'à 10 (dix) cm ont été détectés, soit les plus importants jamais observés. Ces déplacements ne sont pas modélisés dans les corrections conventionnelles réalisées dans les levés de géodésie spatiale, comme l'altimétrie spatiale et les traitements GNSS. Il est donc essentiel d'en tenir compte dans le bassin Amazonien. Les analyses de ces 18 (dix-huit) stations ont permis d'évaluer les modèles proposés pour la correction de la déformation crustale. Ces modèles sont basés d'une part sur différentes solutions du champ de gravité variable issues de la mission spatiale GRACE et d'autre part sur une modélisation hydrologique à base de données météorologiques. Le résultat final de cette évaluation est que la série GRACE / GRGS, donne la meilleure solution pour la correction du phénomène de déformation de la croûte en expliquant jusqu'à 70% des effets non modélisés (Moreira et al., soumis).

En parallèle, le rattachement géodésique à la même référence altimétrique, des règles limnimétriques de plus de 60 (soixante) stations du bassin a été réalisé. Ce rattachement est d'une importance fondamentale pour l'hydrologie puisque certaines de ces stations ont plus de 100 ans de données et sont référencées localement. Ces références arbitraires peuvent subir des mouvements verticaux causés, par exemple, par de grandes inondations des mouvements de terrain et même des tremblements de terre. Ces phénomènes peuvent provoquer la perte de référence établie au niveau local, ce qui rend impossible, la reconstruction des séries hydrologiques. Même des mouvements de faible amplitude de la référence locale peuvent être à tort interprétés comme dus au changement climatique par exemple.

Pendant les campagnes de mesures sur les fleuves pour la réalisation de ces nivellements, des récepteurs GNSS ont été installés sur des bateaux permettant ainsi la réalisation de plus de 20.000 kilomètres de profils longitudinaux des rivières Amazoniennes. Ces profils ont notamment permis la détermination de la pente entre les stations limnimétriques et d'élargir la connaissance de l'hydrologie à des lieux non instrumentés. De plus une stratégie « cinématique » innovante de mise à niveau rapide des stations permettant notamment un gain de temps significatif pour ces opérations de terrain, a été validée.

A partir des données de règles nivelées, de données de pente entre les règles et de la correction de déformation de la croûte, l'évaluation de la qualité des mesures d'altimétrie spatiale obtenues sur les fleuves a pu être améliorée. Dans le cas des données ICESAT du fait de la non répétitivité des traces l'estimation de la pente entre la règle et le lieu d'acquisition des données est impérative. Nous avons traité 445 passages du satellite ICESAT et nous avons trouvé une exactitude de 9 cm pour l'estimation du niveau d'eau.

Les défauts de nivellement des règles contribuent à des erreurs systématiques d'évaluation de la mesure du niveau d'eau (Calmant et al, 2013 et Seyler et al, 2013). Les profils longitudinaux dérivés des séries altimétries de satellites ENVISAT et Jason-2 ont été comparés avec les profils de règles et les profils longitudinaux collectés à partir des récepteurs GNSS à bord des bateaux. Cette comparaison a permis de démontrer que la technique d'altimétrie spatiale peut être étendue à des zones de bassins hydrologiques sans équipement de terrain. L'ensemble des données acquises et des analyses réalisés pour cette étude: profils longitudinaux, nivellements des règles limnimétriques, traitement des données d'altimétrie spatiale, corrections de déformation de la croûte terrestre, visent également à constituer la plus importante base de données de validation pour l'hydrologie des futures missions spatiales comme les missions SENTINEL-3 de l'ESA (1^{er} lancement en 2016) ou la mission CNES/NASA SWOT, dont le lancement est prévu pour l'année 2021.



RESEARCH LETTER

10.1002/2016GL070265

Key Points:

- Crustal displacements derived from GRACE and hydrological models
- Vertical component of GPS time series over the Amazon basin
- Historical flood and drought in the Amazon basin

Supporting Information:

- Figure S1
- Figure S2
- Figure S3

Correspondence to:

D. M. Moreira,
daniel.moreira@cprm.gov.br

Citation:

Moreira, D. M., S. Calmant, F. Perosanz, L. Xavier, O. C. Rotunno Filho, F. Seyler, and A. C. Monteiro (2016), Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin, *Geophys. Res. Lett.*, *43*, 9604–9610, doi:10.1002/2016GL070265.

Received 30 JUN 2016

Accepted 8 SEP 2016

Accepted article online 10 SEP 2016

Published online 29 SEP 2016

©2016. American Geophysical Union.
All Rights Reserved.

Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin

D. M. Moreira^{1,2,3}, S. Calmant⁴, F. Perosanz⁵, L. Xavier⁶, O. C. Rotunno Filho², F. Seyler⁴, and A. C. Monteiro^{1,7}

¹Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, Brazil, ²LABH2O-PEC-COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, ³LEGOS-UMR 5566, Université Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse, France, ⁴Institut de recherche pour le développement, Toulouse, France, ⁵Centre Nationale d'Etudes Spatiale, Toulouse, France, ⁶Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Brazil, ⁷Deceased 9 April 2014

Abstract In large hydrological basins, water mass loading can produce significant crustal deformation. We compare the monthly vertical component of 18 GPS sites located in the Amazon basin, with the deflection models derived from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) observations on the one hand and derived from HYDL, a global hydrological model, on the other hand. The GPS data set includes the largest deflections by hydrological loading ever recorded at two stations located in the center of the basin. The main result of the study is that the GRACE solution produced by GRGS (Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale, Toulouse, France) produces the best agreement with the Global Navigation Satellite Systems series with a correlation coefficient up to 0.9 in the center of the basin, although 70% at best of the RMS variation in the GPS series is accounted for.

1. Introduction

Vertical crustal displacements caused by hydrological loading (hereafter VCD-HL) are poorly monitored since they mostly occur in large tropical basins, where the monitoring of the geophysical processes is complicated by the remoteness of the sites due to lack of infrastructure.

A straightforward method to monitor water load variations would be to use long and continuous coordinate time series from permanent GPS stations. However, in remote regions like the Amazon basin, such equipment is usually limited in number and the corresponding measurements recorded are of low quality due to poor maintenance. *Bevis et al.* [2005] presented, as far as the authors are aware of, the only study published in the literature of vertical displacements based on in situ measurements within the Amazon basin, the largest hydrological basin on Earth encompassing approximately 6,000,000.00 km². They used 2 years of noncontinuous data collected by the MANA GPS station at Manaus, at the center of the basin. This study evidenced a 7.5 cm peak to peak crustal vertical variation. This signal was identified by the referred authors as the signature of the annual flood of the river. Similarly, *Steckler et al.* [2010] explained a cyclic variation of about 5 cm in the vertical coordinate of GPS stations in Bangladesh due to the hydrological cycle of the Ganges-Brahmapoutra system. Other studies from *van Dam et al.* [2001, 2007], *Wu et al.* [2006], *Tesmer et al.* [2011], and *Tregoning et al.* [2009] have identified other regions on the Earth where VCD-HL are large enough to significantly affect geodetic station coordinates. Hence, the effects of hydrological loading have to be considered when centimeter-level accuracy positioning is expected.

Any precise geodetic survey relies on an explicit reference system. The International Terrestrial Reference Frame 2008 [*Altamimi et al.*, 2011], which is called ITRF2008, represents the state of the art in terms of the realization of such system. Its use is recommended through International conventions from the International Earth Rotation and Reference Systems Service [*McCarthy and Petit*, 2011]. According to these conventions the instantaneous position $\vec{X}(t)$ at epoch t of a point relative to the Earth's crust and its regularized position $\vec{X}_R(t)$ are defined by equation (1):

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_R(t) + \sum_i \Delta\vec{X}_i(t) \quad (1)$$

The regularized position is supposed to be free of high-frequency variations. Actual standards for the $\Delta\vec{X}_i(t)$ have the following effects: solid tides arising from the direct effect of the Moon, the Sun, and the planets;

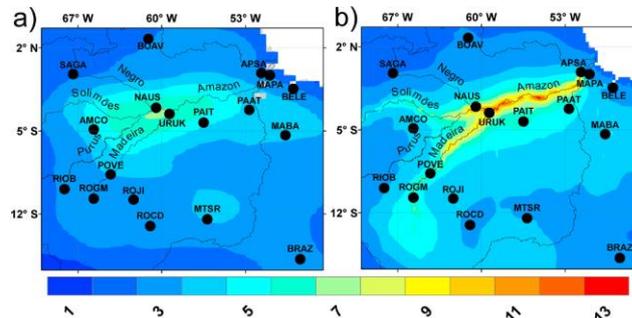


Figure 1. (a) GRACE-derived and (b) HYDL vertical displacement maximum amplitude (cm). Based on 2007–2014 GRACE (GRGS) and HYDL series. Black dots indicate the permanent GPS stations in the Amazon basin used in this study.

ocean tidal loading; diurnal and semidiurnal atmospheric pressure loading; and centrifugal perturbations caused by Earth’s rotation variations, including the pole tide and the loading caused by the ocean pole tide.

In various regions on the Earth, VCD-HL cannot be neglected and should be included in this list but no standard global model exists yet to take this effect into account. In the Amazon basin, not correcting GPS positions from this effect may significantly impact geodetic experiments like network surveying, tide gauge leveling, or satellite altimeter calibration. However, VCD-HL models can be derived from rheological parameters and from either time variable gravity field (TVGF) measurements or hydrological data.

Water mass variations produce slight changes in the Earth’s gravity field. Such variations are perceived by the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) space mission [Tapley *et al.*, 2004], launched in March 2002. These changes in superficial water mass represent more or less load on the Earth’s crust that deflects accordingly. Davis *et al.* [2004] showed an excellent agreement between crustal deformations derived from GRACE data and variations in vertical coordinates at GPS stations using data from the first 2 years of the mission. Later on, Tesmer *et al.* [2011] compared GRACE-derived VCD-HL to time series of the vertical component at 115 permanent GPS stations spread worldwide. They showed that for 80% of the sites, including GRACE-derived time series of VCD-HL in the list of correcting displacement, $\Delta\bar{X}(t)$ reduced significantly the RMS scatter in the GPS series of vertical coordinates. However, none of these studies used stations located within the Amazon basin, while this region undergoes the largest seasonal signal of VCD-HL on Earth (Figure 1).

Van Dam *et al.* [2001] first used hydrological models to derive VCD-HL series. Nevertheless, the correction they obtained for station Up coordinates was much smaller than those found using GRACE data (e.g., around 3 cm peak to peak at the center of the Amazon basin). Recently, Dill and Dobszaw [2013] used the so-called “HYDL” land surface discharge model developed by Dill [2008] to compute VCD-HL. Their results better match GPS series in the Amazon basin. Figure 1b shows that the amplitude of the model reaches 5–7 cm along the central corridor. The main advantage of this model is its higher spatial and temporal resolution compared to GRACE data.

In this study we focused on the Amazon basin which has recently experienced the largest ever hydrological loading deformation. Figure 2 shows the GPS Up coordinate time series for Manaus (NAUS) station compared to vertical displacements derived from GRACE and to hydrological data. The maximal extreme difference reaches 10 cm. We wanted to assess which option, among the various GRACE solutions available and the HYDL model outputs, better reproduces seasonal VCD-HL signal by using as reference a data set made up of 18 GPS permanent stations (Figure 1) located within and near the Amazon watershed.

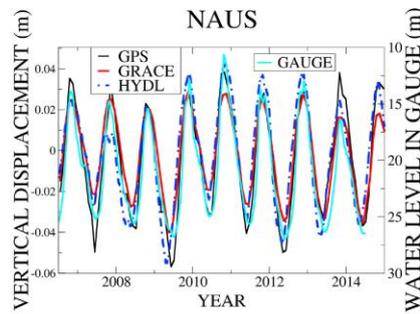


Figure 2. Vertical crustal displacement (cm) at NAUS station using different techniques, namely, the HYDL hydrological model, GRACE mission, and GPS positioning. Note that this station is at the same location in Manaus (cf. Figure 1), as the MANA station used by *Bevis et al.* [2005], now inactive.

differential approach which needs reference stations [Zumberge et al., 1997]. This PPP technique requires high-precision satellite orbit and clock products. We used the one delivered by the CNES-CLS IGS Analysis Center as it was produced using also the GINS software [Loyer et al., 2012] in order to guaranty the highest processing consistency. Coordinates were produced in the ITRF2008 frame, and all the recommended crustal deformation from the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) conventions (see section 1) were considered, including the atmospheric loading correction. Consequently, the remaining variations in the series of vertical coordinate should mainly reflect the hydrological loading as this is the dominant source of not-modeled crustal deformation in the Amazon basin. Daily solutions were averaged on a monthly basis (using a 3 sigma outlier rejection), and the expected accuracy of such processing is below 5 mm 3-D RMS.

2.2. GRACE Data Sets

We analyzed the GRACE monthly series produced by four analyses released by properly established data centers, namely, RL05 from Center for Space Research, University of Texas, U.S. (CSR) [Bettsadpur, 2012]; RL05 from GeoForschungsZentrum, Potsdam, Germany (GFZ) [Dahle et al., 2012]; RL05.1 from Jet Propulsion Laboratory, U.S. (JPL) [Watkins, 2012]; and RL03-v1 from Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS) [Bruinsma et al., 2010]. The set of spherical harmonics coefficients from these groups was first filtered in order to remove the well-known striping artifact affecting GRACE solutions. Then, they were converted into crustal displacements using the methodology developed in Wahr et al. [1998], Davis et al. [2004], and Van Dam et al. [2007]. The GRACE solutions are provided free of atmospheric load; hence, they are natively consistent with our GPS solutions. Because of the characteristics of the mission, the spatial resolution is limited to 3° × 3° in equatorial regions.

2.3. HYDL Data Sets

As an IERS Associated Product Centre, the German GFZ group delivers daily global grids of crustal deflection from the HYDL model (<ftp://ig2-dmz.gfz-potsdam.de/LOADING/>). These grids are distributed at a 0.5° × 0.5° spatial resolution and were resampled at a monthly temporal resolution for our analysis. The hydrological inputs are based on the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) weather models which include terrestrial water storage and runoff. More information about HYDL and ECMWF can be found in Dill and Dobsław [2013] and Balsamo et al. [2009]. VCD-HL series were calculated at the locations of the 18 GPS stations using a bicubic interpolation from the grids. Since this model only includes hydrological loading, crustal deflections are also free of atmospheric load, consistently with our GPS and GRACE solutions of crustal deformation.

2.4. Analysis

Each monthly VCD-HL from the four GRACE gravity data and the HYDL hydrological model has been compared to the averaged vertical coordinates of the 18 Amazonian GPS stations on a time span covering

2. Methodology

2.1. GPS Data

Our analysis is based on a network of 18 GPS stations located within the Amazon basin and at its rim (Figure 1) managed by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Daily station coordinates were computed using the GINS software [Marty et al., 2011] developed by the French Space Agency (CNES). As it was anticipated that the entire region would be affected by significant hydrologic crustal deformation, the Precise Point Positioning (PPP) technique [Heroux and Kouba, 1995], which provides "absolute" positions, has been preferred to the classical relative

Table 1. Comparison of GRACE (CSR, JPL, GFZ, and GRGS Solutions) and HYDL VCD-HL Vertical Displacement Series With GPS Component Solutions (2010 to 2014) at 18 GPS Sites in the Amazon Basin (as Shown in Figure 1): Minimum, Maximum, and Mean Values Corresponding to Scale Factors (Slope of Linear Regression Equation), Linear Correlation Coefficient, and Rate (%) of RMS Signal Reduction (Equation (2))

Series	Scale Factor			Correlation			RMSred (%)		
	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean	Minimum	Maximum	Mean
CSR	0.38	0.96	0.67	0.56	0.93	0.85	18	65	47
JPL	0.36	0.99	0.63	0.59	0.96	0.86	18	65	48
GFZ	0.26	1.13	0.67	0.45	0.93	0.76	1	60	34
GRGS	0.43	1.06	0.7	0.71	0.99	0.9	29	72	55
HYDL	0.45	0.97	0.66	0.66	0.93	0.84	25	64	44

2008 to 2014. The comparison is based on the three following indicators: correlation coefficient, calculated from the linear fitting of the correlation plot; scale factor, given by the slope of the correlation plot; and RMS reduction, calculated from the comparison of the GPS Up coordinate series before and after applying one of the loading corrections. The normalized RMS reduction RMS_{red} was computed from equation (2):

$$RMS_{red} = \frac{RMS_{GPS} - RMS_{GPS-(GRACE\ or\ HYDL)}}{RMS_{GPS}} \times 100\% \quad (2)$$

where RMS_{GPS} is the RMS of the GPS series and $RMS_{GPS-(GRACE\ or\ HYDL)}$ is the RMS of the GPS series corrected from one of the VCD-HL models.

3. Results

At the center of the basin where the three largest tributaries converge, the NAUS (Figure 2) and URUK station series display the largest vertical variations ever recorded due to hydrological loads (up to 10 cm peak to peak). It is worth noting that the variations recorded by the GPS stations is larger than those presented by *Bevis et al. [2005]* because our series include the largest floods (2009 and 2012) and drought (2010) ever measured in the Amazon basin.

From a more general point of view, Table 1 summarizes the gravity and hydrological models evaluation for the entire network using the three indicators defined in section 2.4. The main conclusions are as follows:

1. RMS in the GPS series is significantly reduced, and it should be noted that from 20 to 70% of the GPS signal can be explained by hydrological loading.
2. On the other side around 50% of the residuals remain not modeled; this is also reflected by the scale factor estimations.
3. The high level of correlation confirms that the entire observed GPS signal is driven by seasonal processes.
4. Looking altogether over the three indicators, the VCD-HL derived from GRGS GRACE model systematically agrees better with the GPS series.

Therefore, only results from GRACE GRGS solutions and HYDL will be shown hereinafter. The four maps in Figures 3a–3d display the RMS reduction and correlation indicators obtained from both gravity (GRGS) and hydrological (HYDL) models. For most stations the gravity model exhibits a correlation greater than 0.9 (Figure 3a) and reaches 0.97 at NAUS and 0.99 at URUK where the largest deformations occur. The lowest correlations are found at PAIT (0.84) and RIOB (0.71) stations on the Tapajós and Madeira subbasins, respectively. This might be assigned to the limited spatial resolution of GRACE which cannot separate the local hydrological signals from these different tributaries.

In addition, the correlation coefficient is significantly worse in MAPA than in ASPA, while the two stations are close and similarly affected by VCD-HL. Having a closer look at the original daily GPS solutions, we noticed that the MAPA series had a significantly worse repeatability than ASPA (respectively 1.3 cm and 0.7 cm of standard deviation around the monthly averaged value). We suspect the electromagnetic environment of the MAPA antenna as being the disturbance source (i.e., multipath), but more investigation will be needed.

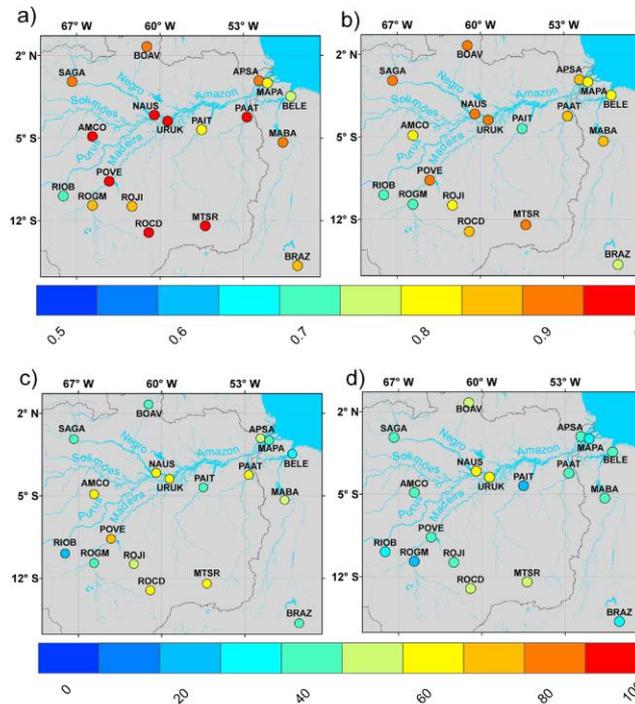


Figure 3. Correlation between GPS Up component time series and VCD-HL data derived from (a) GRACE/GRGS solutions and (b) HYDL. GPS Up series rate (%) of RMS signal reduction (equation (2)) using (c) GRACE/GRGS and (d) HYDL VCD-HL models.

Results using the HYDL VCD-HL (Figure 3b) show a less regular pattern over the watershed. Stations located in the Negro subbasin (SAGA, BOAV, and NAUS) show the greatest correlations with GPS data (0.909, 0.912, and 0.921, respectively), as well as URUK and POVE (0.932 and 0.904) on the Madeira subbasin. More results from other stations (especially at PAIT and ROGM) may indicate some quality discrepancies of the hydrological models for some subbasins. Even though HYDL model represents a great effort for evaluating hydrological load in better spatial resolution, the complex characteristics of Amazon watershed (e.g., with strong back-water effects and many important floodplains regions) would suggest the use of a more complex modeling approach in order to suitably be able to represent the basin's main hydrological processes.

Following the results presented in Figures 3c and 3d, HYDL led to a smaller reduction (44% on average for the 18 GPS stations) when compared to GRGS (55%). This difference can be explained by a lower HYDL correlation on average (0.84 versus 0.90). Nevertheless, from 30 to 70% of the GPS Up signal remains unexplained as already pointed out in Table 1.

4. Conclusions and Discussion

VCD-HL can affect station seasonal Up coordinates at the level of 10 cm in the Amazon basin area. GPS positioning in such location has to be corrected. However, the IERS International Standards have not yet published a model; therefore, most geodetic software do not include such correction. In this study we have

evaluated four sources of GRACE TVGF and the HYDL hydrological model to compute VCD-HL corrections for 18 GPS sites in the Amazon basin. At most of the stations, gravity data and hydrological model were highly and similarly correlated with GPS series. However, a strong correlation up to 50% of the original signal remained unexplained by the VCD-HL models. This could be attributed to many factors, such as a difference in phase and/or amplitude between the modeled 2-D crustal deformation and the punctual measurements at the GPS sites. Moreover, some characteristics of the GRACE data features, like their coarse spatial resolution, the filtering procedure, and the signal leakage from nearby regions can impact differently the derived deformation depending on the site location. Regarding HYDL data, even though their series were available at a finer resolution, our analysis suggests that some limitations remain in the hydrologic modeling of the Amazon watershed. A longer period, including the 2009 and 2012 floods, and an updated version (1.2) of HYDL may explain that larger amplitudes are found in the present study compared to those found by Dill and Dobsław [2013].

Although further work is needed on the interpretation of the RMS in the vertical component of the GPS series, the results showed herein are encouraging. The best agreement was found when using TVGF data from GRGS.

In addition to the strong VCD-HL seasonal signal, we observed a linear trend in the lower part of the Amazon basin of -1 mm/year. This result may be connected to a recent result from Reager *et al.* [2016]. They evidenced an increase of water storage in the Amazon basin in a study based on GRACE data. This corresponding increase of water storage represents a trend in the VCD-HL consistent with our results.

Acknowledgments

Initially, the authors would like to thank the Civil Engineering Program of the Institute Alberto Luiz Coimbra of Graduate School and Research in Engineering (COPPE), Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) through the support of the Laboratory of Water Resources and Environmental Issues (LABH2O), the Brazilian Geological Survey-Division of Applied Hydrology (CPRM), National Water Agency (ANA), the *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ)* through the project E-26/103.116/2011 (2012–2014) and the Project Thinking Rio (2014–2017)-E-26/010.002980/2014, and National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) with the project 485136/2013-9 (2015–2017), which is focused on remote sensing applied to rainfall runoff modeling. We would like also to specially recognize the support of the organizations responsible for operating and maintaining the GPS sites used in this study, notably, the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), CPRM and IRD participated by providing funding to the study under the framework of the Project *Dinâmica Fluvial*, and CNES participated by means of the project TOSCA/FOAM. All coauthors confirm that they have no conflict of interest with the publication of the present results.

References

Altamimi, Z., X. Collilieux, and L. Métivier (2011), ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame, *J. Geod.*, doi:10.1007/s00190-011-0444-4.

Balsamo, G., P. Viterbo, A. Beljaars, B. Van Den Hruk, M. Hirschi, A. K. Betts, and K. Scipal (2009), A revised hydrology for the ECMWF model: Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System, *J. Hydrometeorology*, 623–643, doi:10.1175/2008JHM1068.1.

Bettadpur, S. (2012), UTCSR level-2 processing standards document, Version 4. [Available at [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/L2-CSR0005_ProcStd_v4.0.pdf](http://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/L2-CSR0005_ProcStd_v4.0.pdf)].

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.

Bruinsma, S., J.-M. Lemoine, R. Biancale, and N. Valès (2010), CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 02) and their evaluation, *Adv. Space Res.*, 45, 587–601.

Dahle, C., F. Flechtner, C. Gruber, D. König, R. König, G. Michalak, and K.-H. Neumayer (2012), GFZ RL05: An improved time series of monthly GRACE gravity field solutions. In: Observation of the system Earth from space—CHAMP, GRACE, GOCE and future missions, *Adv. Technol. Earth Sci.*, 29–39, doi:10.1007/978-3-642-32135-1_4.

Davis, J. L., P. Elosegui, J. X. Mitrovica, and M. E. Tamiseia (2004), Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24605, doi:10.1029/2004GL021435.

Dill, R. (2008), Hydrological model LSDM for operational Earth rotation and gravity field variations, Scientific Technical Report 08/09, Deutsches Geoforschungszentrum GFZ doi:10.2312/GFZ.b103-08095.

Dill, R., and H. Dobsław (2013), Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 5008–5017, doi:10.1002/jgrb.50353.

Héroux, P., and J. Kouba (1995), GPS precise point positioning with a difference, Presented at Geomatics 1995, Ottawa, Ontario, Canada, 13–15 June.

Loyer, S., F. Perosanz, F. Mercier, H. Capdeville, and J. C. Marty (2012), Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center, *J. Geod.*, 86(11), 991–1003.

Marty, J. C., et al. (2011), GINS: The CNES/GRGS GPS scientific software, 3rd International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, In: ESA Proceedings WPP326, 31 August–2 September 2011, Copenhagen, Denmark.

McCarthy, D. D., and G. Petit (Eds.) (2011), IERS conventions 2010, IERS Technical Note No. 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany.

Reager, J. T., A. S. Gardner, J. S. Famiglietti, D. N. Wiese, A. Eicker, and M.-H. Lo (2016), A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology, *Science*, doi:10.1126/science.aad8386.

Steckler, M. S., S. L. Nooner, S. H. Akhter, S. K. Chowdhury, S. Bettadpur, L. Seeber, and M. G. Kogan (2010), Modeling Earth deformation from monsoonal flooding in Bangladesh using hydrographic, GPS, and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data, *J. Geophys. Res.*, 115, B08407, doi:10.1029/2009JB007018.

Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004), The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607 ifc Technical Report STR08/09, GFZ, Potsdam, Germany, doi:10.1029/2004GL019920.

Tesmer, V., P. Steigenberger, T. vanDam, and T. Mayer-Gürr (2011), Vertical deformations from homogeneously processed GRACE and global GPS long-term series, *J. Geod.*, 85, 291–310, doi:10.1007/s00190-010-0437-8.

Tregoning, P., C. Watson, G. Ramillien, H. McQueen, and J. Zhang (2009), Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15401, doi:10.1029/2009GL038718.

Van Dam, T., J. Wahr, P. C. D. Milly, A. B. Shmakin, G. Blewitt, D. Lavallee, and K. Larson (2001), Crustal displacements due to continental water loading, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 651–654, doi:10.1029/2000GL012120.

- Van Dam, T., J. Wahr, and D. Lavallée (2007), A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe, *J. Geophys. Res.*, *112*, B03404, doi:10.1029/2006JB004335.
- Wahr, J., M. Molenaar, and F. Bryan (1998), Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *J. Geophys. Res.*, *103*, 30,205–30,229, doi:10.1029/98JB02844.
- Watkins, M. (2012), JPL level-2 processing standards document, Version 4. [Available at [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/L2-JPL_ProcStds_v5.1.pdf](http://podaac.jpl.nasa.gov/allData/grace/docs/L2-JPL_ProcStds_v5.1.pdf).]
- Wu, X., M. B. Heflin, E. R. Ivins, and I. Fukumori (2006), Seasonal and interannual global surface mass variations from multisatellite geodetic data, *J. Geophys. Res.*, *111*, B09401, doi:10.1029/2005JB004100.
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. Watkins, and F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, *102*, B03, doi:10.1029/96JB03860.