

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**CARLOS ALBERTO CORRÊA E CASTRO JÚNIOR**

**ARCABOUÇO GRAVIMÉTRICO BRASILEIRO E O MEIO AMBIENTE:  
POSSIBILIDADES E PERSPECTIVAS**

**TESE DE DOUTORADO**

**GOIÂNIA-GO**

**2018**

---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**      ☐ Dissertação      ☒ Tese

**2. Identificação da Tese ou Dissertação:**

Nome completo do autor: **CARLOS ALBERTO CORRÊA E CASTRO JÚNIOR**

Título do trabalho: **ARCABOUÇO GRAVIMÉTRICO BRASILEIRO E O MEIO AMBIENTE: POSSIBILIDADES E PERSPECTIVA**

**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM      ☐ NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



---

Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:



---

Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 06/05/2018

---

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

**CARLOS ALBERTO CORRÊA E CASTRO JÚNIOR**

**ARCABOUÇO GRAVIMÉTRICO BRASILEIRO E O MEIO AMBIENTE:  
POSSIBILIDADES E PERSPECTIVAS**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Ciências Ambientais da Pró-Reitoria de Pós-graduação da Universidade Federal de Goiás, como requisito ao título de Doutorado em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Magna Júnior

**GOIÂNIA - GO**

**2018**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

CORRÊA E CASTRO JÚNIOR, CARLOS ALBERTO  
ARCABOUÇO GRAVIMÉTRICO BRASILEIRO E O MEIO  
AMBIENTE: POSSIBILIDADES E PERSPECTIVA [manuscrito] /  
CARLOS ALBERTO CORRÊA E CASTRO JÚNIOR. - 2018.  
234 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira; coorientador Dr.  
João Paulo Magna Júnior.

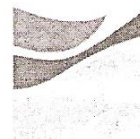
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Pró-reitoria de  
Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais, Goiânia, 2018.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. gravimetria. 2. geodesia. 3. meio ambiente. I. Clementino  
Ferreira, Nilson, orient. II. Título.

CDU 528



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ATA DA DEFESA PÚBLICA DE TESE Nº 005/2018

Aos trinta dias do mês de abril do ano de dois mil e dezoito, às 14:00, reuniu-se na Sala Caryocar, 2º andar, Bloco A, Escola de Engenharia Civil e Ambiental - EECA/UFG, Câmpus Colemar Natal e Silva, a Banca Examinadora composta pelos: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira – CIAMB, o Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – CIAMB, a Dr.ª Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos – CENEGEO, o Prof. Dr. Denizar Blitzkow – EPUSP, e o Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães - Engenharia de Agrimensura e Cartográfica/UFU para, sob a presidência do primeiro, proceder a defesa da Tese intitulada: **“Arcabouço gravimétrico brasileiro e o meio ambiente: possibilidades e perspectivas”**, de autoria de Carlos Alberto Corrêa e Castro Júnior, discente de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB), área de concentração em Estrutura e Dinâmica Ambiental. Foi realizada a avaliação oral no sistema de apresentação e defesa de tese de autoria do discente. Terminada a avaliação oral, a Banca Examinadora reuniu-se emitindo os seguintes pareceres mediante as justificativas e sugestões abaixo:

| Membro da Banca                             | Parecer<br>(Aprovado/Reprovado) | Assinatura |
|---------------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Dr. Nilson Clementino Ferreira              | APROVADO                        |            |
| Dr. Klebber Teodomiro M. Formiga            | APROVADO                        |            |
| Dr.ª Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos | APROVADO                        |            |
| Dr. Denizar Blitzkow                        | APROVADO                        |            |
| Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães         | Aprovado                        |            |

JUSTIFICATIVAS e SUGESTÕES:

Após a avaliação, o referido discente foi considerado Aprovado na defesa de tese. Às 18:00 horas, o Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira, Presidente da Banca Examinadora, deu por encerrada a sessão e, para constar, lavrou-se a presente Ata.

Prof. Dr. Klebber Teodomiro M. Formiga  
Membro Titular

Dr.ª Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos  
Membro Titular

Prof. Dr. Denizar Blitzkow  
Membro Titular

Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães  
Membro Titular

Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira  
Presidente

Dedico este trabalho à minha mulher,  
amiga e companheira, Rosana  
Cristina, pelo apoio e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Nilson Clementino Ferreira, grande orientador, pelo constante estímulo e direcionamento seguro dos rumos deste doutoramento. Não fossem essas apropriadas recomendações, certamente eu teria desistido no meio de caminho. Agradeço especialmente pelas oportunas e geniais sugestões à elaboração de diversos trechos da tese.

Ao meu Coorientador, Professor Doutor João Paulo Magna Júnior, pela extrema cordialidade e competência com que ajudou a orientar os trabalhos vinculados a esta tese, mormente aqueles correlacionados ao interpolador TPS.

Ao meu amigo, Professor Doutor Gabriel Guimarães, jovem talento da Geodésia brasileira, pela permanente ajuda, atenção e respeito profissional. Não há palavras para expressar o profundo agradecimento pelas reiteradas orientações, especialmente na elaboração do modelo geoidal de Goiás.

À Doutora Ana Cristina Cancoro de Matos, pelos constantes ensinamentos e valiosas contribuições à tese, sobretudo no tocante ao cálculo do modelo geoidal. Tem sido uma honra poder contar com essa diletta amizade.

Aos amigos da Gerência de Geodésia e Cartografia de Goiás: Ângelo Demétrius, Clayton Rocha, Daniel Lima, Fernanda Magri, José Araújo e João Pereira, pela permanente cooperação e especial ajuda na obtenção e tratamento primário dos dados vinculados a esta tese.

Aos amigos do IBGE: Cristina Lobianco, Eduardo Michalzechen, Luiz Paulo Fortes, Marcia Cristina Carneiro, Marcelo Nunes, Natália Lengruber, Nívia Maio, Péricles Prado, Roberto Luz, Sônia Costa e Valéria Oliveira, pelas preciosas informações e relevantes colaborações durante o transcorrer deste doutorado.

À Unidade Estadual de Goiás do IBGE, em nome de seu titular, Dr. Edson Roberto Vieira, pelo apoio e compreensão ante aos meus eventuais afastamentos motivados pelo doutoramento.

Aos velhos amigos, Ademar de Brito e Habib Sallum, Engenheiros Cartógrafos brilhantes ligados ao segmento hidroenergético brasileiro, pelas competentes sugestões ao capítulo sobre a Geodésia aplicada às UHEs.

Aos Professores e Secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás (CIAMB), pela compreensão diante das minhas falhas ao longo de todo o curso.

Ao Professor Doutor Leonardo Castro de Oliveira, amigo desde os tempos bicudos de graduação na UERJ, pelas oportunas sugestões e contribuições efetuadas à tese.

Aos Professores da UFG-EEC, Hugo José Ribeiro e Wellington Nunes de Oliveira, pela grata possibilidade de efetuar o estágio docência em suas respectivas disciplinas.

Aos amigos Professores do Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura do IFG Campus Goiânia, Domingos Queiroz, João Cortes, Fábio Macedo e Nilton Nazareno, pela amizade e respeito profissional sempre demonstrados e, também, pelas proveitosas interações entre o IFG e o IBGE de Goiás.

Ao Mestre Alexandre do Prado, pelo excelente apoio prestado às atividades de levantamentos altimétricos em réguas limnimétricas da ANA. Embora esses experimentos não façam parte das pesquisas inseridas nesta tese, por razões diversas, as ideias motivadoras ainda persistem e poderão trazer contribuições futuras à comunidade usuária.

Ao Doutor Luiz Gustavo Rodrigues Pinto, pelas prestimosas informações referentes às ações gravimétricas do Serviço Geológico do Brasil, atual denominação da antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Ao Professor Doutor Silvio Rogério Correia de Freitas, ícone da Geodésia continental, por discorrer gentilmente sobre as atividades gravimétricas no âmbito do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Ao Geólogo José Ribamar Lopes Bezerra, pelas iniciativas e informações referentes ao Banco Nacional de Dados Gravimétricos Terrestres, pertencente à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Ao Doutor Mauro Andrade de Sousa, pelas contribuições à Gravimetria brasileira e significativas informações sobre a trajetória do Observatório Nacional no contexto gravimétrico.

Aos diletos colegas de turma do CIAMB 2013, Doutores Eduardo Pacífico e Roberto Bezerra, pela distinguida atenção e reiteradas ajudas no transcorrer do doutoramento.

À minha amada família pela compreensão diante das minhas ausências em função das atividades acadêmicas e profissionais. Cabem agradecimentos especiais à minha filha Caroline, pelo permanente estímulo, e ao meu genro Rafael, pela formatação das figuras inseridas na tese.

Ao grande amigo e companheiro de inesquecíveis jornadas gravimétricas, Professor Titular Denizar Blitzkow, referência maior da gravimetria nacional e continental, pela amizade, incentivo, respeito, confiança e ensinamentos durante trinta anos de convívio profissional. Nesta oportunidade manifesto a minha gratidão pela cessão de dados, preciosas informações e, sobretudo, pela revisão desta tese.

“Estamos literalmente mergulhados no campo da gravidade apesar de, em geral, nos esquecermos disso. Existem na natureza forças mais espetaculares em suas manifestações, como as forças elétricas e as magnéticas, mas nenhuma é onipresente como a da gravidade”.

Camil Gemael

## RESUMO

A Geodesia, uma das vertentes que compõe as Geociências, se ocupa do estudo da forma, dimensões e campo da gravidade terrestre, além de oferecer a infraestrutura de referência ao desenvolvimento social e econômico em todo o planeta. No Brasil, a infraestrutura geodésica vem se desenvolvendo ao longo do tempo por meio da implantação de redes, planialtimétricas e gravimétricas, de alta precisão. Nos últimos anos a Geodesia conta com as tecnologias satelitárias para propiciar posicionamentos rápidos, precisos e acurados, que permitem considerar os movimentos e deformações das placas litosféricas globais. Esta tese trata da sinergia entre a infraestrutura geodésica nacional e algumas questões ambientais da atualidade. Assim, além de esmiuçar detalhes da Geodésia, teve como primeiro objetivo avaliar a hipótese de que, nas regiões mais desenvolvidas do Brasil, a rede gravimétrica atua como infraestrutura consolidada para a implementação de outras infraestruturas de Engenharia; em contrapartida, nas regiões menos desenvolvidas e de difícil acesso, as redes gravimétricas evoluem conforme as demandas por infraestrutura surgem. A avaliação dessa hipótese envolveu a análise da distribuição da rede gravimétrica brasileira e sua relação espacial e estatística com o Índice de Desenvolvimento Humano e a distribuição da população. Os resultados obtidos confirmaram que, no Brasil, há uma correlação entre a cobertura espacial da rede gravimétrica e o Índice de Desenvolvimento Humano. Na região Norte há uma deficiência na cobertura da rede gravimétrica, explicada pelo desenvolvimento socioeconômico precário, dificuldades de acesso, e por grandes extensões de terras protegidas. Os resultados obtidos demonstraram, ainda, que o modelo geoidal nacional resultante da rede gravimétrica, MAPGEO2015, atende a 89,72% da população brasileira. Outra hipótese avaliada é a de que, devido às grandes dimensões das regiões hidrográficas brasileiras e à quantidade de estações ativas da rede SIRGAS implantadas em parte do território nacional, a associação entre dados altimétricos das estações SIRGAS com a quantidade de água armazenada no subsolo, detectada pelo sistema de satélites GRACE, ocorrem de maneira precária. A avaliação dessa hipótese envolveu a correlação entre dados de variação de altitudes das estações ativas da rede SIRGAS e dados oriundos do sistema de satélites GRACE. Os resultados confirmaram que, em algumas das regiões hidrográficas brasileiras, foi encontrada uma correlação estatística entre a variação altimétrica da rede SIRGAS e os dados GRACE. Os resultados sugerem que o adensamento da rede de estações ativas pode resultar na configuração de um sistema de monitoramento hidrológico, de fundamental importância nos eventos climáticos extremos, como os que produzem crises de abastecimento hídrico ou alagamentos e inundações. Na tese também foi proposto um novo modelo geoidal para o estado de Goiás, o MODGEO-GO, elaborado a partir de novos levantamentos em campo que propiciaram um adensamento da rede gravimétrica do estado de Goiás. O MODGEO-GO poderá contribuir, com maior eficácia, para o planejamento e implantação de grandes obras de infraestrutura necessárias para o desenvolvimento goiano. Finalmente, foi realizada a avaliação do modelo de interpolação global, com efeito local, denominado *Thin Plate Spline*, utilizando-se dados do MAPGEO2105. Os resultados mostraram o grande potencial desse interpolador, que pode ser adotado em futuras modelagens de superfícies geoidais no Brasil.

**Palavras-chave:** gravimetria, geodesia, meio ambiente.

## **ABSTRACT**

Geodesy, one of the strands that compose the Geosciences, deals with the study of Earth's gravity shape, dimensions and field, besides providing the reference infrastructure for social and economic development throughout the planet. In Brazil, the geodetic infrastructure has been developed over time through the implementation of high precision planialtimetric and gravimetric networks. In recent years, Geodesy has relied on satellite technologies to provide fast, precise and accurate positioning that allows considering the movements and deformations of global lithospheric plates. This thesis refers to the synergy between the national geodetic infrastructure and some current environmental issues. Thus, besides exploring Geodesy minutiae, the first objective was to evaluate the hypothesis that, in the most developed regions of Brazil, the gravimetric network acts as a consolidated infrastructure for the implementation of other Engineering infrastructures; on the other hand, in regions that are less developed and difficult to access, gravimetric networks evolve as infrastructure demands arise. The evaluation of this hypothesis involved the analysis of Brazilian gravimetric network distribution and its spatial and statistical relation to the Human Development Index and the population distribution. The results confirmed that in Brazil there is an correlation between spatial coverage of the gravimetric network and the Human Development Index. In the North region there is a deficiency in gravimetric network coverage, explained by precarious socioeconomic development, access difficulties, and large tracts of protected land. The obtained results also demonstrated that the national geoidal model resultant from gravimetric network MAPGEO2015 serves 89.72% of Brazilian population. Another evaluated hypothesis is that due to the large proportion of Brazilian hydrographic regions and to the number of installed active stations of SIRGAS network in part of the national territory, the association between SIRGAS stations altimetric data and the amount of water stored underground, detected by GRACE satellite system, occurs precariously. The evaluation of this hypothesis involved the correlation between altitude variation data from SIRGAS active stations and GRACE satellite system data. The results confirmed that in some of Brazilian hydrographic regions a statistical correlation was found between the altimetric variation of SIRGAS network and GRACE data. The results suggest that densification of active stations network can provide a hydrological monitoring system of fundamental importance in extreme climatic events, such as those that produce water supply crises or floods. In this work, a new geoidal model for state of Goiás, MODGEO-GO, was also proposed, based on new in loco surveys that led to a densification of Goiás gravimetric network. MODGEO-GO can assist more effectively planning and implementing major infrastructure works necessary for Goiás development. Finally, the global interpolation model with local effect, called Thin Plate Spline, was evaluated with MAPGEO2105 data. The results showed great potential of this interpolator, which can be adopted in future modeling of geoidal surfaces in Brazil.

**Keywords:** gravimetry, geodesy, environment.

## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCLUSÕES

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Estrutura da União Internacional de Geodesia e Geofísica.....                                                                                                                                                                    | 27 |
| Figura 2 - Coordenadas geodésicas planimétricas.....                                                                                                                                                                                        | 35 |
| Figura 3 - RBMC.....                                                                                                                                                                                                                        | 38 |
| Figura 4 - RAAP, com a inserção das novas linhas altimétricas implantadas no Amapá, a partir de 2013, alcançando a fronteira com a Guiana Francesa no Oiapoque.....                                                                         | 41 |
| Figura 5 - Heterogeneidade temporal da RAAP.....                                                                                                                                                                                            | 43 |
| Figura 6 - Superfícies equipotenciais da Terra real e Terra normal.....                                                                                                                                                                     | 44 |
| Figura 7 - Modalidades de representação e obtenção do número geopotencial.....                                                                                                                                                              | 45 |
| Figura 8 - Principais superfícies de referência consideradas pela Geodesia.....                                                                                                                                                             | 46 |
| Figura 9 - Princípio do nivelamento geométrico, tendo à esquerda a representação de um lance e, à direita, uma sucessão de lances, caracterizando um nivelamento composto.....                                                              | 48 |
| Figura 10 - Não paralelismo entre os geopes ( $\Delta n_i \neq \Delta H_i$ ).....                                                                                                                                                           | 49 |
| Figura 11 - Altitude geodésica (h).....                                                                                                                                                                                                     | 51 |
| Figura 12 - Altitude ortométrica (H).....                                                                                                                                                                                                   | 51 |
| Figura 13 - Correlação entre as altitudes ortométrica (H) e geodésica (h).....                                                                                                                                                              | 53 |
| Figura 14 - Altitude normal ( $H^N$ ).....                                                                                                                                                                                                  | 54 |
| Figura 15 - Altitudes discutidas no contexto desta tese.....                                                                                                                                                                                | 55 |
| Figura 16 - Acervo do BNDG.....                                                                                                                                                                                                             | 57 |
| Figura 17 - Panorama gravimétrico multi-institucional brasileiro.....                                                                                                                                                                       | 59 |
| Figura 18 - Câmeras para rastreamento ótico de satélites.....                                                                                                                                                                               | 60 |
| Figura 19 - Princípio do Sistema SLR. As estações de controle (B1, B2, B3) emitem feixes de laser aos dispositivos refletores instalados nos satélites, permitindo monitorar com exatidão as oscilações orbitais e posições dos mesmos..... | 61 |
| Figura 20 - Coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y, Z) e coordenadas curvilíneas geodésicas ( $\varphi, \lambda, h$ ).....                                                                                                           | 62 |

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 21 - Variação do nível médio dos mares com base em informações satelitais. No decorrer de mais de 20 anos o nível médio dos oceanos vem subindo alguns milímetros por ano..... | 64  |
| Figura 22 - imagens ilustrativas do satélite CHAMP e do posicionamento satélite-a-satélite.....                                                                                       | 66  |
| Figura 23 - Satélites da missão GRACE.....                                                                                                                                            | 67  |
| Figura 24 - Satélite e Geoide inerentes à missão GOCE.....                                                                                                                            | 68  |
| Figura 25 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis.....                                                                                                                            | 70  |
| Figura 26 - A Geodesia no contexto das SBA.....                                                                                                                                       | 72  |
| Figura 27 - Estrutura observacional do GGOS, compreendendo cinco níveis de observação.....                                                                                            | 79  |
| Figura 28 - Interligação entre os três pilares da geodesia moderna e os componentes principais da infraestrutura de referência GGOS.....                                              | 80  |
| Figura 29 - Principais elementos e correlações presentes na estrutura do GGOS, a partir dos três pilares da geodesia moderna.....                                                     | 81  |
| Figura 30 - Rede ITRF 2008.....                                                                                                                                                       | 83  |
| Figura 31 - Proposta das 163 estações que poderão materializar globalmente o IHRF.....                                                                                                | 84  |
| Figura 32 - Previsão inicial das estações do IHRF no Brasil.....                                                                                                                      | 85  |
| Figura 33 - Representação esquemática do ciclo hidrológico global.....                                                                                                                | 89  |
| Figura 34 - Alguns resultados oferecidos pela missão GRACE em território brasileiro.....                                                                                              | 90  |
| Figura 35 - Etapas do ciclo existente na AP que necessitam, direta ou indiretamente, de informações posicionais.....                                                                  | 91  |
| Figura 36 - As diferenças cromáticas evidenciam valores médios das temperaturas, em unidades Kelvin, advindas do modelo global GPT2w.....                                             | 93  |
| Figura 37 - Usinas hidrelétricas planejadas no Brasil, por região hidrográfica.....                                                                                                   | 95  |
| Figura 38 - Estações da RAAP usadas na validação do MAPGEO2015, denotando a extensa área onde a avaliação ainda é inviável.....                                                       | 99  |
| Figura 39 - Hidrografia fronteiriça, denotando a possibilidade de futuros aproveitamentos hidrelétricos transnacionais.....                                                           | 102 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 40 - MODGEO-GO.....                                                                                  | 109 |
| Figura 41 - Discrepâncias nos pontos de verificação do MAPGEO2015, antes e após o controle com GNSS/RN..... | 109 |

## APÊNDICE 1

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Dados gravimétricos disponíveis de 1800 a 1980 (a) e incertezas das medidas para o mesmo período (b)..... | 130 |
| Figura 2 - Gravímetro FG-5 (a) e gravímetro A-10 (b).....                                                            | 131 |
| Figura 3 - Vista superior do gravímetro L&R (a), mecanismo do gravímetro (b) e parte interna do equipamento (c)..... | 133 |
| Figura 4 - Detalhes do gravímetro CG-5.....                                                                          | 133 |
| Figura 5 - Gravímetro CG-6.....                                                                                      | 133 |
| Figura 6 - LAGEOS 1.....                                                                                             | 134 |
| Figura 7 - Modelo EIGEN-03S (metros).....                                                                            | 134 |
| Figura 8 - Imagens ilustrativas do satélite CHAMP e do posicionamento satélite-a-satélite.....                       | 135 |
| Figura 9 - Imagens do satélite GRACE.....                                                                            | 136 |
| Figura 10 - Satélite (a) e Geoide (b) inerentes à missão GOCE.....                                                   | 137 |
| Figura 11 - Sistema 3D – FTG.....                                                                                    | 138 |
| Figura 12 - Acervo de aerogravimetria no BNDG.....                                                                   | 138 |
| Figura 13 - Gravímetro marinho L&R.....                                                                              | 139 |
| Figura 14 - Dados de gravimetria marinha constantes no BNDG e acervo LEPLAC.....                                     | 140 |
| Figura 15 - Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira.....                                                            | 141 |
| Figura 16 - Acervo do BNDG.....                                                                                      | 142 |
| Figura 17 - Estações gravimétricas usadas no modelo geoidal sul-americano.....                                       | 144 |
| Figura 18 - Gravimetria na Amazônia (a) e no Pantanal (b).....                                                       | 145 |
| Figura 19 - Estações gravimétricas medidas pelo IBGE.....                                                            | 145 |
| Figura 20 - Panorama gravimétrico multi-institucional brasileiro.....                                                | 146 |

## APÊNDICE 2

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Transformação de altitude geodésica (h) em altitude ortométrica (H) através da ondulação geoidal (N).....                                                                                                                                                                                                                                          | 156 |
| Figura 2 - Arcabouço gravimétrico terrestre considerado neste trabalho.....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 158 |
| Figura 3 - Mesorregiões brasileiras, utilizadas como unidade de análise.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 159 |
| Figura 4 - Exemplo de grade de anomalias gravimétricas, utilizada na modelagem do MAPGEO2015.....                                                                                                                                                                                                                                                             | 160 |
| Figura 5 - Principais etapas consideradas na metodologia empregada.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 161 |
| Figura 6 - Quantidade de pontos gravimétricos nas unidades da federação.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 162 |
| Figura 7 - Densidade de pontos gravimétricos nas mesorregiões brasileiras.....                                                                                                                                                                                                                                                                                | 163 |
| Figura 8 - Distribuição da grade que possui pelo menos um ponto gravimétrico. Embora haja semelhança com a figura (1), que retrata o arcabouço gravimétrico pontual brasileiro, em função da escala, a subdivisão em quadriculas permite identificar melhor os vazios gravimétricos e apontar com maior clareza as necessidades de futuros levantamentos..... | 164 |
| Figura 9 - Relação entre o IDH e a cobertura gravimétrica das mesorregiões do Brasil.....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 165 |
| Figura 10 - Modelo de Ondulações Geoidais MAPGEO 2015.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 165 |
| Figura 11 - Região onde o modelo de ondulações geoidais foi validado.....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 166 |
| Figura 12 - Células da grade de anomalias sem pontos gravimétricos terrestres.....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 167 |
| Figura 13 - Distribuição das usinas hidrelétricas existentes e planejadas na bacia amazônica.....                                                                                                                                                                                                                                                             | 168 |

## APÊNDICE 3

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Área de estudo formada por quatro grandes bacias hidrográficas no Brasil. As delimitações das bacias nas regiões fronteiriças não foram efetuadas porque as mesmas extrapolam o território nacional..... | 176 |
| Figura 2 - Receptores GNSS que Integravam a Rede SIRGAS / RBMC, em janeiro de 2014.....                                                                                                                             | 177 |
| Figura 3 - Coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais e coordenadas geodésicas curvilíneas.....                                                                                                             | 178 |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4 - Dados GRACE de EWT para o mês de abril de 2012, com destaque ao grande volume d'água subterrânea em parte da bacia amazônica..... | 180 |
| Figura 5 - Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a região hidrográfica do rio Paraná.....                                      | 181 |
| Figura 6 - Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a região hidrográfica do rio Tocantins.....                                   | 182 |
| Figura 7 - Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a bacia hidrográfica do rio São Francisco.....                                | 183 |
| Figura 8 - Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a bacia hidrográfica do rio Amazonas.....                                     | 184 |
| Figura 9 - Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Paraná.....                                       | 185 |
| Figura 10 - Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Tocantins.....                                   | 185 |
| Figura 11 - Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco.....                               | 186 |
| Figura 12 - Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Amazonas.....                                    | 187 |
| Figura 13 - Relacionamento anual entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Amazonas.....                              | 188 |

#### **APÊNDICE 4**

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Componentes de longo, médio e curto comprimento de ondas nas ondulações geoidais.....                                                                                         | 195 |
| Figura 2 - Vazios altimétricos do SGB, realçando a ausência de cobertura no bioma Amazônia.....                                                                                          | 197 |
| Figura 3 - Áreas consideradas no MODGEO-GO: área efetivamente modelada (em vermelho), área de dados gravimétricos (azul) e área correspondente ao modelo digital de terreno (verde)..... | 199 |
| Figura 4 - EEGG utilizadas no MODGEO-GO: estabelecidas antes de 2013 (em sépia) e medidas posteriormente (azul).....                                                                     | 200 |
| Figura 5 - Quadrículas de 5' x 5' na região modelada pelo MODGEO-GO.....                                                                                                                 | 201 |
| Figura 6 - Equipamentos usados nas determinações das EEGG.....                                                                                                                           | 203 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 7 - MDT SAM3s_v2.....                                                                                                                                                                                                                                              | 205 |
| Figura 8 - Medições GNSS em RRNN.....                                                                                                                                                                                                                                     | 206 |
| Figura 9 - Etapas da elaboração de um modelo geoidal.....                                                                                                                                                                                                                 | 207 |
| Figura 10 - Exemplo de Correção do Terreno.....                                                                                                                                                                                                                           | 208 |
| Figura 11- Platô de Bouguer.....                                                                                                                                                                                                                                          | 209 |
| Figura 12 - Anomalia Bouguer completa em grade de 5'. As áreas na tonalidade branca não possuem valor de $g$ .....                                                                                                                                                        | 211 |
| Figura 13 - Correção geoide – quase geoide no MODGEO-GO.....                                                                                                                                                                                                              | 212 |
| Figura 14 - Anomalia de Helmert no MODGEO-GO.....                                                                                                                                                                                                                         | 214 |
| Figura 15 - Elementos envolvidos na composição da ondulação geoidal: ondulação co-geoidal ( $N^C$ ) e efeito topográfico indireto primário ( $N_{ind}$ ).....                                                                                                             | 217 |
| Figura 16 - MODGEO-GO calculado com os MGGs: A) EIGEN-6C4; B) GOCO05c e C) GECO.....                                                                                                                                                                                      | 218 |
| Figura 17 - Histogramas das discrepâncias auferidas nas estações (GNSS/RN) usadas na avaliação do MODGEO-GO para os três MGGs. Na parte superior utilizando até grau e ordem 200. Na parte inferior grau e ordem 250.....                                                 | 220 |
| Figura 18 - MODGEO-GO calculado com MGG EIGEN-6C4, grau e ordem 250.....                                                                                                                                                                                                  | 221 |
| Figura 19 - Discrepâncias da comparação das 140 GNSS/nivelamento com os modelos geoidais calculados para graus e ordens 200, na parte superior, e 250, na parte inferior.....                                                                                             | 222 |
| Figura 20 - Correlação entre as diferenças padrão das 140 estações GNSS/nivelamento com a densidade de densificação gravimétrica existente. A coloração azulada representa as EEGG mais antigas enquanto as esverdeadas compreendem as EEGG medidas a partir de 2013..... | 223 |
| Figura 21 - Diferenças padrão auferidas nas estações de controle medidas na região da Serra de Caldas Novas (circundada em verde) denotando possível influência geológica na conformação e na qualidade do MODGEO-GO.....                                                 | 224 |

## APÊNDICE 5

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - Distribuição dos pontos do GRID e RN/GPS.....                       | 232 |
| Figura 2 - Ondulação geoidal no Estado de Goiás.....                           | 232 |
| Figura 3 - Distribuição dos pontos de controle e verificação nas amostras..... | 233 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4 - Discrepâncias nos pontos de verificação antes e após o controle com GNSS/RN..... | 234 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## **LISTA DE TABELAS**

### **INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCLUSÕES**

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Unidades de medida de $g$ .....                                                                                                                                                             | 55  |
| Tabela 2 - Satélites rastreados pelo sistema DORIS.....                                                                                                                                                | 64  |
| Tabela 3 - Dados da análise estatística dos dois últimos modelos geoidais nacionais evidenciando as diferenças padrão máximas e mínimas correspondentes, bem acima da tolerância exigida pela ANA..... | 100 |
| Tabela 4 - Comparação entre a interpolação bilinear e por TPS.....                                                                                                                                     | 110 |

### **APÊNDICE 4**

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Características dos modelos do geopotencial utilizados no cálculo do MODGEO-GO.....                                                                                | 204 |
| Tabela 2 - Comparação entre as ondulações geoidais das 140 RRNN com os modelos geoidais calculados e o MAPGEO2015, evidenciando melhores resultados com grau e ordem 250..... | 219 |
| Tabela 3 - Comparações entre o MODGEO-GO e os resultados regionais do MAPGEO2015, em metros.....                                                                              | 221 |

### **APÊNDICE 5**

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Estatísticas nas estações GNSS/RN.....           | 233 |
| Tabela 2 - Estatísticas das discrepâncias das amostras..... | 233 |

## **LISTA DE QUADROS**

### **INTRODUÇÃO, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCLUSÕES**

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Áreas de Benefício Social do GEOSS contempladas pela moderna Geodesia..... | 73 |
| Quadro 2 - Indicadores da avaliação socioambiental de usinas hidrelétricas.....       | 96 |

## SUMÁRIO

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                        | 25  |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                                              | 33  |
| 2.1 A Ciência Geodésica.....                                              | 33  |
| 2.2 O Contexto Planimétrico .....                                         | 34  |
| 2.3 O Contexto Altimétrico .....                                          | 39  |
| 2.4 O Contexto Gravimétrico.....                                          | 55  |
| 2.5 Geodesia Espacial .....                                               | 59  |
| 2.6 Geodesia como subsídio ao Desenvolvimento Sustentável.....            | 68  |
| 2.6.1 A Observação Sistemática da Terra - GEO e GEOSS .....               | 70  |
| 2.6.2 A Informação Geoespacial no âmbito da Geodesia.....                 | 73  |
| 2.6.3 O Sistema de Observação Geodésica Global - GGOS.....                | 78  |
| 2.6.4 O Referencial Geodésico do Futuro - GGRS e GGRF.....                | 81  |
| 2.7 Algumas Interações da Geodesia Contemporânea.....                     | 86  |
| 2.7.1 Estudo de caso: aplicações geodésicas em Usinas Hidrelétricas ..... | 93  |
| 3 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....                    | 105 |
| 4 REFERÊNCIAS.....                                                        | 111 |
| <b>APÊNDICE 1</b> .....                                                   | 126 |
| EVOLUÇÃO DA INFRAESTRUTURA GRAVIMÉTRICA NO BRASIL.....                    | 127 |
| INTRODUÇÃO .....                                                          | 127 |
| MEDIÇÃO DA ACELERAÇÃO DE GRAVIDADE .....                                  | 128 |
| GRAVIMETRIA TERRESTRE .....                                               | 129 |
| Determinação Absoluta da Gravidade Terrestre .....                        | 130 |
| Gravímetros FG-5 e A-10.....                                              | 130 |
| Determinação Relativa de Gravidade Terrestre .....                        | 131 |
| Gravímetro LaCoste & Romberg - modelo G .....                             | 132 |
| Gravímetros Scintrex .....                                                | 133 |
| GRAVIMETRIA SATELITAL.....                                                | 133 |
| LAGEOS - LAsEr GEODynamics Satellite .....                                | 133 |
| CHAMP - CHAllenging Minisatellite Payload .....                           | 134 |
| GRACE - Gravity Recovery And Climate Experiment .....                     | 135 |
| GOCE - Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer .....    | 136 |
| GRAVIMETRIA AÉREA E MARINHA.....                                          | 137 |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PRINCIPAIS INSTITUIÇÕES BRASILEIRAS PRODUTORAS DE GRAVIMETRIA                                                                                | 140 |
| Observatório Nacional (ON) .....                                                                                                             | 140 |
| Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) .....                                                                      | 141 |
| Serviço Geológico do Brasil (CPRM) .....                                                                                                     | 142 |
| Universidade Federal do Paraná (UFPR) .....                                                                                                  | 142 |
| Universidade de São Paulo (USP) .....                                                                                                        | 143 |
| Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).....                                                                                  | 144 |
| CONCLUSÕES .....                                                                                                                             | 146 |
| REFERÊNCIAS.....                                                                                                                             | 147 |
| <b>APÊNDICE 2</b> .....                                                                                                                      | 151 |
| A DISTRIBUIÇÃO DA REDE GRAVIMÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO HUMANO NACIONAL .....                                                                | 152 |
| RESUMO .....                                                                                                                                 | 152 |
| ABSTRACT .....                                                                                                                               | 153 |
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                                           | 154 |
| 2 METODOLOGIA.....                                                                                                                           | 157 |
| 3 RESULTADOS .....                                                                                                                           | 161 |
| 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                                                                 | 168 |
| 5 REFERÊNCIAS.....                                                                                                                           | 169 |
| <b>APÊNDICE 3</b> .....                                                                                                                      | 171 |
| ANÁLISE DE DADOS DA MISSÃO GRACE E DA REDE SIRGAS PARA O MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS DO BRASIL ..... | 172 |
| RESUMO .....                                                                                                                                 | 172 |
| ABSTRACT .....                                                                                                                               | 172 |
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                                                                                           | 173 |
| 2 METODOLOGIA.....                                                                                                                           | 175 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                | 181 |
| 4 CONCLUSÕES .....                                                                                                                           | 188 |
| 5 REFERÊNCIAS.....                                                                                                                           | 189 |
| <b>APÊNDICE 4</b> .....                                                                                                                      | 191 |
| O MODELO GEOIDAL DE GOIÁS – MODGEO-GO.....                                                                                                   | 192 |
| RESUMO .....                                                                                                                                 | 192 |
| ABSTRACT .....                                                                                                                               | 193 |

|                                                                                               |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                                            | 194        |
| 2 O PORQUÊ DE UM MODELO GEOIDAL PARA GOIÁS .....                                              | 196        |
| 2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....                                                                  | 198        |
| 3 MATERIAL .....                                                                              | 199        |
| 3.1 Estações gravimétricas terrestres .....                                                   | 199        |
| 3.2 Modelo Global do Geopotencial .....                                                       | 203        |
| 3.3 Modelo Digital do Terreno .....                                                           | 204        |
| 3.4 Medições GNSS em RRNN .....                                                               | 205        |
| 4 METODOLOGIA USADA NA ELABORAÇÃO DO MODGEO-GO .....                                          | 206        |
| 4.1 Cálculo da correção do terreno .....                                                      | 207        |
| 4.2 Anomalias pontuais de ar livre e Bouguer.....                                             | 208        |
| 4.3 Cálculo das anomalias médias de Bouguer .....                                             | 210        |
| 4.4 Cálculo das anomalias médias ar livre .....                                               | 211        |
| 4.5 Cálculo da correção geoide – quase geoide .....                                           | 211        |
| 4.6 Cálculo das anomalias de Helmert.....                                                     | 213        |
| 4.7 Remoção dos longos comprimentos de onda .....                                             | 214        |
| 4.8 Integração de Stokes .....                                                                | 214        |
| 4.9 Restauração dos longos comprimentos de onda .....                                         | 216        |
| 4.10 Correção do efeito topográfico indireto .....                                            | 216        |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                 | 217        |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                  | 224        |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                              | 225        |
| <b>APÊNDICE 5.....</b>                                                                        | <b>229</b> |
| INTEGRAÇÃO DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL NO AJUSTE DO MODELO GEOIDAL<br>PARA O ESTADO DE GOIÁS..... | 230        |
| 1 INTRODUÇÃO .....                                                                            | 231        |
| 2 THIN-PLATE SPLINES .....                                                                    | 231        |
| 3 METODOLOGIA E EXPERIMENTOS.....                                                             | 232        |
| 3.1 Seleção dos dados.....                                                                    | 232        |
| 3.2 Estimativa dos coeficientes TPS .....                                                     | 232        |
| 3.3 Avaliação da qualidade do modelo geoidal sem a utilização de estações<br>GNSS/RN.....     | 233        |
| 3.4 Avaliação da qualidade do modelo geoidal com a utilização de estações<br>GNSS/RN.....     | 233        |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 4 CONCLUSÕES ..... | 234 |
| 5 REFERÊNCIAS..... | 234 |

## 1 INTRODUÇÃO

A busca pelo conhecimento acerca da formação, características e dinâmicas do planeta Terra, proporcionou o desenvolvimento de um importante conjunto de ciências que tratam especificamente da Terra, em escala global, regional e local. Essas ciências da Terra, também conhecidas por Geociências, consideram a dinâmica interna e externa do planeta, que está relacionada com a forma, dimensões, campos de gravidade e magnético, clima, hidrosfera, camadas gasosas, interações planetárias, além da distribuição de espécies da fauna e da flora (CORDANI, 1995). Nos dias atuais, os geocientistas lidam com um grande arcabouço tecnológico, que vem acelerando expressivamente a produção científica (GILL et al., 2016).

Para se compreender os processos dinâmicos inerentes ao planeta Terra, consideram-se, além das interações entre tais processos, o atendimento às necessidades da sociedade moderna; nesse contexto, segundo Cordani (1995), as Geociências buscam contemplar os seguintes objetivos:

- produção de conhecimentos a respeito dos processos e interações dinâmicas do Sistema Terra;
- monitoramento integrado dos processos do Sistema Terra;
- prospecção e gerenciamento de recursos minerais e energéticos;
- conservação e gestão dos recursos hídricos e edáficos;
- preservação e gerenciamento de fauna e flora;
- prevenção e redução de efeitos de desastres naturais;
- apoio a projetos de engenharia em geral; e
- suporte às ações de desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento das variadas vertentes das geociências culminou com a formação de uma grande comunidade científica, que vem se organizando desde seus primórdios para interagir com as diferentes esferas científicas afins. Em âmbito global, foi criado o Conselho Internacional de Uniões Científicas, em 1931, posteriormente designado Conselho Internacional de Ciência (ICSU, *International Council for Science*), dando continuidade aos objetivos previamente estabelecidos por duas organizações internacionais que o antecederam: a Associação Internacional de Academias (IAA, *International Association of Academies*) e o Conselho de Pesquisa Internacional (IRC, *International Research Council*). A razão maior que norteou a

criação do ICSU foi a de fortalecer a Ciência visando o benefício da sociedade (ICSU, 2016).

Das Associações Científicas que fazem parte do ICSU, uma, em especial, chama a atenção por representar o caráter interdisciplinar requerido pelas Geociências. Trata-se da União Internacional de Geodesia e Geofísica (IUGG, *International Union of Geodesy and Geophysics*), que agrupa oito Associações Internacionais semiautônomas, além de Comissões, Comitês, Grupos de Trabalho e Serviços voltados aos problemas relacionados com a forma, superfície, camadas gasosas circundantes e estrutura interna da Terra, bem como a hidrosfera e criosfera (IUGG, 2016).

As denominações das oito Associações pertencentes à IUGG, ilustradas pela Figura 1, denotam a abrangência e interdependência dos temas estudados com as questões geocientíficas: Associação Internacional de Geodesia (IAG, *International Association of Geodesy*); Associação Internacional de Ciências Criosféricas (IACS, *International Association of Cryospheric Sciences*); Associação Internacional de Aeronomia e Geomagnetismo (IAGA, *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*); Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS, *International Association of Hydrological Sciences*); Associação Internacional de Meteorologia e Ciências da Atmosfera (IAMAS, *International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences*); Associação Internacional para as Ciências Físicas dos Oceanos (IAPSO, *International Association for the Physical Sciences of the Oceans*); Associação Internacional de Sismologia e de Física do Interior da Terra (IASPEI, *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior*); e a Associação Internacional Vulcanologia e de Química do Interior da Terra (IAVCEI, *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*).

**Figura 1** – Estrutura da União Internacional de Geodesia e Geofísica



Fonte: O autor

Por sua interação permeada em inúmeras ciências e estreita aderência aos objetivos desta tese, a IAG se distingue e merece enfoque pormenorizado. Com o surgimento na segunda metade do século XIX, para inicialmente concatenar e disseminar as ações científicas relacionadas com a Geodesia em países da Europa Central. Trata-se de uma das mais antigas Associações Científicas do planeta, cujas atividades têm acompanhado os avanços da Geodesia, apoiando pesquisas voltadas às análises, modelagens e interpretações dos dados levantados, fornecendo informações importantes sobre as variações temporais da forma, dimensões, campo de gravidade, interações interplanetárias e movimentos da Terra (IAG, 2014). Em suma, atualmente a Geodesia ocupa papel preponderante no cenário geocientífico mundial e oferece subsídios para que outras ciências equacionem seus problemas e expliquem fenômenos correlacionados com os seus respectivos domínios.

Além das interações interplanetárias com a Terra, a Geodesia trata o planeta como um sistema dinâmico, por conta das suas características internas e externas. Portanto, considera que as dimensões, forma e campo de gravidade se alteram ao longo do tempo, devido a interações com outros corpos celestes e ao comportamento dinâmico da estrutura interna do planeta, que resultam em deslocamentos de sua crosta.

Nos dias atuais, a Geodesia vem considerando também as consequências das mudanças climáticas, principalmente sobre o campo de gravidade. No Canadá, Rangelova, Sideris & Fotopoulos (2009), propuseram um novo modelo de referência para altitudes que considera as variações do nível dos oceanos, resultantes das mudanças climáticas globais.

Outros estudos importantes retratam o Estado da Arte das Ciências Geodésicas, tal como o apresentado por Ruegg et al., (2002), que efetuaram o monitoramento de deformações associadas com o ciclo sísmico na região centro-sul do Chile, por meio de uma rede de receptores GPS, e concluíram que havia uma forte possibilidade de ocorrência de abalos sísmicos de grande magnitude naquele território. Em fevereiro de 2010, a região de Concepción sofreu um abalo sísmico de 8,8 de magnitude.

Por meio de séries temporais de deslocamentos de coordenadas geodésicas, mensuradas em redes de estações com receptores de sinais GNSS<sup>3</sup>, Bevis & Brown (2014), desenvolveram um modelo de evolução dos movimentos da crosta terrestre que permite aos geodestas e geofísicos parametrizar padrões de aceleração de deslocamentos e deformações transitórias após eventos sísmicos.

Considerando as características dinâmicas do Sistema Terra, os países das Américas do Sul e Central, com importante participação de instituições brasileiras, vêm gerenciando o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS). Além de servir como uma estrutura geodésica básica de referência (referencial geodésico geocêntrico) o SIRGAS conta com a rede ativa<sup>4</sup> SIRGAS-CON, formada por cerca de 400 estações GNSS de monitoramento contínuo. A rede SIRGAS-CON, é capaz de gerar, dentre outros resultados, séries temporais das coordenadas de cada estação, possibilitando assim a determinação dos deslocamentos das estações em função da movimentação da crosta terrestre. Adicionalmente monitora os movimentos locais, como subsidência e/ou soerguimento crustal, causados por fenômenos naturais, como por exemplo, terremotos, além de efeitos sazonais causados por fatores diversos (COSTA et al., 2012).

---

<sup>3</sup> Sistemas globais de navegação por satélite, (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), abrangendo todos os sistemas de posicionamento existentes além do norte americano GPS: o GLONASS da Rússia, o europeu GALILEU e o BEIDOU, desenvolvido pela China. Recomenda-se a leitura de Monico (2008) para melhor compreensão do assunto.

<sup>4</sup> A denominação de estação ativa será esmiuçada no decorrer da tese.

Da mesma forma que ocorre com outras vertentes das Geociências, a Geodesia é aplicada em diversas atividades da sociedade atual, servindo de base para mapeamentos precisos e obras de construção civil de grande porte, além disso, é largamente utilizada em demarcações fronteiriças. Mais recentemente vem sendo empregada na prevenção e redução de desastres naturais, além de suporte às ações de desenvolvimento sustentável.

Por meio da aplicação de técnicas de mensuração geodésica, foi realizado o monitoramento de deformações na barragem da usina hidrelétrica de Oymapinar, localizada na região sul da Turquia. Esse monitoramento foi realizado por um conjunto de 12 pilares de observação implantados próximos à barragem, pelos quais se realizou, sistematicamente, a mensuração de uma rede de 25 pontos fixos localizados na estrutura da barragem (GULAL, 2013). Monitoramentos congêneres também foram empreendidos na Usina Hidrelétrica de ITAIPU com o auxílio de métodos geodésicos (FAZAN, 2010; RIBEIRO, 2008).

As obras de Engenharia, em geral, têm o objetivo de dar suporte ao desenvolvimento econômico e social da população. Contudo, os avanços científicos e tecnológicos das últimas décadas, em relação à observação de variáveis geodésicas por meio de satélites, têm resultado na produção de conhecimentos que podem ser aplicados a diversas questões ambientais de interesse dos mais variados setores da sociedade. Li et al., (2012), observaram anomalias no armazenamento de águas subterrâneas, por meio de dados da missão *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) nas regiões oeste e central da Europa, por um período de 7 anos, possibilitando a adoção dessa tecnologia no monitoramento de grandes lapsos de estiagem, que possam comprometer o abastecimento das populações.

No Brasil, as resoluções CONAMA 001, de 23 de janeiro de 1986 (CONAMA, 1986), e 237, de 19 de dezembro de 1997 (CONAMA, 1997), estabelecem que obras de grande porte com objetivos finalísticos de transporte (terrestre, marítimo, aéreo, hidroviário, etc.), de geração e transmissão de energia, de extrativismo mineral e vegetal, de urbanização e saneamento, e de infraestrutura industrial; necessitam de estudos de impacto ambiental e de elaboração de relatórios de impactos ao meio ambiente. O pressuposto inicial para que as informações resultantes de tais estudos sejam consistentes é que as mesmas devem ser construídas a partir de mapeamentos confiáveis, elaborados a partir de levantamentos geodésicos que considerem a forma, as dimensões e o campo de gravidade terrestre.

Para atender a tais exigências os modernos sistemas de posicionamento por satélites podem oferecer precisões tridimensionais milimétricas, conforme o instrumental utilizado. No entanto, a altimetria ainda é um problema, pois as altitudes obtidas por meio de receptores GNSS não consideram o campo de gravidade terrestre, razão pela qual necessitam de modelos geoidais<sup>5</sup> para que sejam efetuadas as correções apropriadas.

Nos trabalhos de construção da infraestrutura geodésica brasileira, os modelos geoidais são obtidos por meio de dados gravimétricos, mensurados em sua grande maioria por levantamentos terrestres. Após o processamento desses dados gravimétricos, o modelo geoidal resultante necessita ser validado por meio da utilização de dados da rede altimétrica de alta precisão. As grandes dimensões do território brasileiro, aliada às dificuldades de acesso físico em áreas isoladas, fazem com que esses levantamentos gravimétricos e altimétricos não sejam espacialmente densos e homogêneos. Assim, os modelos geoidais em algumas regiões brasileiras possuem boa consistência, ao passo que, em outras determinadas regiões, a consistência pode ser deficiente para a execução de trabalhos que necessitem de alta acurácia altimétrica.

Nas últimas décadas, vêm sendo realizados levantamentos gravimétricos aéreos, principalmente para a prospecção mineral. No entanto, esses levantamentos podem ser incorporados na modelagem geoidal desde que devidamente conduzidos. O governo dos Estados Unidos lançou um projeto de pesquisa com duração de 10 anos, ao custo de 38 milhões de dólares, denominado “redefinição do Datum Vertical Americano pela gravidade”. O instrumento utilizado é um gravímetro aéreo acoplado a um receptor GNSS, instalados em uma aeronave Cessna Citation II pertencente à *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA). Os gravímetros são utilizados na mensuração da aceleração de gravidade, ao mesmo tempo em que os instrumentos GNSS, a bordo de satélites da Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*), medem a posição vertical do avião. Assim tem sido possível elaborar levantamentos altimétricos regionais extensos, em terra e no mar, sem as inconsistências do nivelamento geométrico tradicional (JOHNSON, 2009).

---

<sup>5</sup> A conceituação de modelo geoidal será esmiuçada mais adiante no contexto da tese.

No que tange aos empreendimentos hidrelétricos a questão ambiental e geopolítica ganha contornos preocupantes, na medida em que os reservatórios formados à montante das barragens contêm imensos volumes d'água, compreendem extensas regiões alagadas e ainda não são suficientemente conhecidos. Tais reservatórios necessitam de mapeamento detalhado e constante monitoramento altimétrico, visando à delimitação das cotas máximas e a desejável eficiência energética, conforme preconizado pelas Agências Nacionais Reguladoras.

Por outro lado, os lamentáveis episódios ocorridos com o rompimento da Barragem de Fundão, em 2015, no município de Mariana, Minas Gerais, atraíram as atenções para as regiões situadas à jusante das barragens hidrelétricas, permitindo depreender a importância que a componente altimétrica exerce também à jusante das barragens, em conformidade com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei 12.334, de 20/9/2010.

No estado de Goiás, nesses últimos anos, vêm ocorrendo um expressivo adensamento da rede gravimétrica. Esse adensamento possibilitou a elaboração de um modelo geoidal mais consistente para o território goiano. Propõe-se que esse novo modelo geoidal estadual, seja acessado por um método de interpolação de superfícies, denominado Thin Plate Spline (TPS), e comparado com a forma tradicional de acesso.

Atualmente, medições de gravidade também podem auxiliar às informações provenientes de plataformas orbitais, como a moderna missão GRACE. Por meio dessa plataforma, tem sido possível mapear variações sazonais na gravidade terrestre, devido ao deslocamento de grandes massas de água subterrâneas. Essa variação sazonal também é percebida pelos receptores GNSS da rede de monitoramento SIRGAS. Vários trabalhos (COSTA et al, 2012; BRUNINI et al, 2016; MONTECINO et al, 2016), já tratam do relacionamento matemático existente entre variações altimétricas de receptores GNSS e dados GRACE.

Esta tese trata da interação entre a infraestrutura geodésica nacional e algumas questões ambientais da atualidade. Foi formatada seguindo o estilo de artigos científicos, sendo composta, primeiramente, por esta introdução, que apresenta uma contextualização inicial da temática, além da descrição sintética das principais hipóteses e assuntos abordados. Em seguida há um capítulo contendo uma fundamentação teórica necessária ao entendimento dos principais temas discutidos, oferecendo, adicionalmente, um desejável detalhamento da ciência geodésica e

algumas das inter-relações com importantes atividades contemporâneas. Após esse marco teórico, um texto conclusivo faz um breve repasse dos principais elementos inseridos no corpo da tese, contendo recomendações e considerações a respeito dos resultados obtidos e suas relações com as questões e hipóteses aventadas. Complementando, são apensados os cinco artigos científicos que tratam de importantes questões abordadas no decorrer de todo o texto.

Dentre as questões levantadas nesta tese, aquelas coincidentes com os cinco artigos propostos, são relatadas a seguir:

1. A evolução do arcabouço gravimétrico nacional brasileiro tem sido compatível com as necessidades da comunidade científica e usuária?
2. No Brasil, a rede gravimétrica nacional vem sendo concebida como uma infraestrutura de infraestruturas, ou ela é construída a partir das demandas geradas pelos empreendimentos de Engenharia, que ocorrem conforme o desenvolvimento social e econômico das várias regiões brasileiras?
3. A rede ativa de receptores GNSS do SIRGAS pode ser utilizada no monitoramento da disponibilidade hídrica das grandes bacias hidrográficas do Brasil?
4. Quais as melhorias ocorridas no modelo geoidal de Goiás, com o adensamento gravimétrico implantado nos últimos anos?
5. A integração das ondulações geoidais obtidas diretamente em estações da RAAP pode melhorar a qualidade de um modelo geoidal, a partir da utilização de funções *Thin Plate Spline*?

Para a primeira questão levantada, uma sinopse enfocando a produção das principais instituições brasileiras envolvidas com gravimetria evidencia o interesse da comunidade científica em estabelecer padrões acerca da aquisição e manutenção do acervo auferido, visando dar maior homogeneidade às informações obtidas e disponibilizadas ao usuário. Esse tópico compõe o artigo intitulado “EVOLUÇÃO DA INFRAESTRUTURA GRAVIMÉTRICA NO BRASIL” que já foi submetido e aceito pela Revista Geociências (qualis B1 - Ciências Ambientais).

Na segunda questão a hipótese é a de que, nas regiões mais desenvolvidas do Brasil, a rede gravimétrica atua como uma infraestrutura para a implementação de outras infraestruturas de Engenharia; no entanto, em regiões menos desenvolvidas e de difícil acesso, as redes gravimétricas evoluem conforme as demandas por infraestrutura surgem. Uma proposta de artigo “A DISTRIBUIÇÃO DA REDE

GRAVIMÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO HUMANO NACIONAL” versa sobre o tema.

A terceira premissa é a de que a associação entre dados altimétricos da rede SIRGAS brasileira com os dados GRACE, ocorre de maneira precária. Essa questão é endossada pela quantidade de estações ativas da rede SIRGAS, distribuídas de forma heterogênea em território nacional, diante das grandes dimensões das principais bacias hidrográficas nacionais. O terceiro artigo inserido na tese, denominado “ANÁLISE DE DADOS DA MISSÃO GRACE E DA REDE SIRGAS PARA O MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS DO BRASIL”, discorre sobre o tema.

Para o quarto quesito, a hipótese é a de que, no estado de Goiás, com o adensamento gravimétrico estabelecido a partir de 2013, houve melhorias no modelo geoidal, não somente nas regiões onde ocorreram os adensamentos, mas em todo o território goiano. Para tratar deste assunto foi elaborado o artigo denominado “O MODELO GEOIDAL DE GOIÁS – MODGEO-GO”.

A quinta hipótese é a de que o uso do modelo de interpolação global com efeito local, denominado *Thin Plate Spline*, pode ser adotado na integração das ondulações geoidais obtidas diretamente nas RRNN com as anomalias gravimétricas advindas de levantamentos terrestres, a fim de melhorar a consistência de modelos geoidais gravimétricos. Essa hipótese foi defendida no artigo “INTEGRAÇÃO DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL NO AJUSTE DO MODELO GEOIDAL PARA O ESTADO DE GOIÁS”, apresentado recentemente no IV Simpósio Brasileiro de Geomática – SBG 2017.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 A Ciência Geodésica**

A origem do vocábulo geodesia vem do grego e pode ser subentendido por “compartilhar a Terra” (BARLIER & LEFEBVRE, 2001). Uma definição clássica é dada por Helmert (1880) que trata a Geodesia como a ciência que mede e representa a superfície terrestre.

Dentre as diversas definições sobre a ciência geodésica, a mais atual é dada pela Associação Internacional de Geodesia (IAG, *International Association of Geodesy*), mencionando que Geodesia é a ciência que trata da Terra como um sistema dinâmico complexo, um corpo constituído de várias camadas envolvido pela

atmosfera e os oceanos. Em consonância com tal definição, pode-se dizer que a Geodesia se incumba precipuamente em monitorar (NCR, 2010):

- a Terra sólida (ex: deslocamentos tectônicos e não tectônicos);
- as variações na Terra líquida (ex: nível dos mares, derretimento polar);
- as variações na rotação terrestre (ex: movimento polar, duração dos dias);
- a determinação de órbitas para satélites científicos; a atmosfera, por técnicas de posicionamento por satélites (ex: ionosfera, troposfera);
- as variações temporais no campo de gravidade da Terra; e,
- a determinação de posições de pontos na superfície terrestre ou acima dela, bem como as variações temporais dessas posições, com alta precisão.

Além das questões científicas, a Geodesia tem grande importância para a Engenharia, pois as execuções de projetos sem infraestrutura geodésica confiável podem resultar em grandes prejuízos. Desta forma, para se tratar conceitualmente da Geodesia de um país, é necessário também considerar os vários aspectos históricos inerentes ao estabelecimento das redes geodésicas, que servem de infraestrutura para as demais infraestruturas do país. Vanícek & Krakiwsky (1986), propuseram um enfoque baseado em três vertentes fundamentais: o posicionamento (planimétrico e altimétrico), o estudo do campo de gravidade e as variações temporais de ambos.

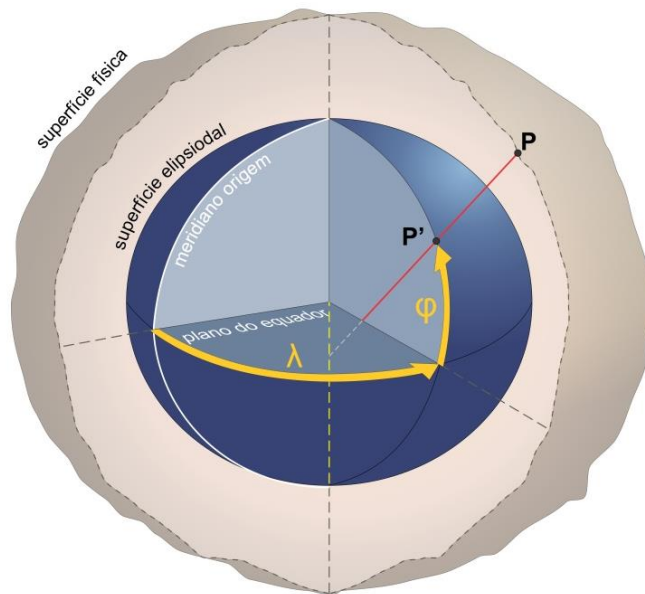
No Brasil, a infraestrutura geodésica é composta por uma rede planimétrica, recentemente denominada de planialtimétrica, uma rede altimétrica e uma rede gravimétrica, que atualmente consideram as variações temporais dos dados correspondentes. Apesar de, por muito tempo, no Brasil e no mundo, as redes geodésicas serem construídas e tratadas separadamente, numa abordagem mais moderna busca-se a integração de todas essas redes para a construção de um único sistema de referência geodésico, de abrangência global.

## 2.2 O Contexto Planimétrico

O contexto planimétrico em Geodesia está relacionado, em geral, com a obtenção das coordenadas planimétricas geodésicas, latitude ( $\varphi$ ) e longitude ( $\lambda$ ), associadas a um Sistema Geodésico de Referência Terrestre. As determinações de tais coordenadas tiveram origem na Dinamarca, durante o século XVI, por meio dos chamados procedimentos clássicos, conduzidos por medições angulares em estações de referência. Tais estações eram coincidentes com vértices de triângulos inseridos

em polígonos que, encadeados entre si, formavam as chamadas redes ou cadeias de triangulação. A Figura 2 oferece uma visualização das coordenadas geodésicas planimétricas de um ponto  $P$  situado na superfície terrestre; nota-se que a figura que representa a forma geométrica da Terra, onde está  $P'$ , é um elipsoide de revolução.

**Figura 2** – Coordenadas geodésicas planimétricas



**Fonte:** O autor

No Brasil, os primeiros levantamentos geodésicos planimétricos foram realizados em 1906 pela Comissão da Carta Geral do Brasil (CCGB), através de triangulação, visando à demarcação das fronteiras ao Sul do país (MELLO, 1981). Entretanto, apenas em 1944 a Rede Planimétrica de Alta Precisão (RPAP), do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), passou a ser estabelecida sistematicamente pelo então Conselho Nacional de Geografia (CNG), precursor do IBGE. A metodologia empregava os procedimentos clássicos de triangulação que perduraram até o ano de 1991, quando foi alterada a plataforma tecnológica de levantamentos geodésicos planimétricos no Brasil.

Embora também fosse realizada a medição de desníveis entre as estações nesses procedimentos clássicos, as altitudes resultantes não possuíam acurácia suficiente para suportar a execução de projetos de engenharia, por isso tais redes eram consideradas apenas como sendo planimétricas.

As coordenadas planimétricas são relacionadas a um Sistema Geodésico de Referência, também denominado Datum Geodésico Horizontal (DGH), composto essencialmente por uma superfície de referência (elipsoide) associada a um conjunto

de pontos que formam uma rede geodésica. Os Sistemas de Referência utilizados inicialmente no Brasil eram não geocêntricos, ou seja, o centro do elipsoide desses referenciais não coincidia com o centro de massa da Terra. Além disso, tratavam-se de referenciais com um único ponto origem.

As primeiras origens escolhidas para a RPAP, ainda na década de 1940, foram estações próximas às cidades de Criciúma e Itararé (RODRIGUEZ, 1977). No início da década de 1960, o vértice de triangulação (VT) Córrego Alegre localizado em Minas Gerais, foi escolhido para a origem planimétrica do SGB (MELLO, 1981). Posteriormente, com o intuito de unificação de um Sistema de Referência Horizontal para a América do Sul começaram os estudos para a adoção do *South American Datum* of 1969 (SAD69). Foi escolhido então o VT Chuá, situado nas imediações da cidade de Uberaba-MG, como ponto origem. A denominação SAD 69, só foi consagrada em 1977, com a anuência da comunidade científica internacional (id., ibid).

Devido às características dos equipamentos e técnicas de levantamento geodésicos disponíveis nos primórdios da RPAP, acarretando a necessidade de intervisibilidade entre os pontos, sua evolução tornou-se inviável diante das dificuldades impostas pela natureza, sobretudo no Pantanal Mato-grossense e na floresta amazônica. Para possibilitar a continuidade da implantação da infraestrutura geodésica planimétrica em regiões de difícil acesso, métodos de posicionamento a partir de satélites artificiais foram adotados, em conformidade com o avanço tecnológico. O primeiro a ser utilizado, entre as décadas de 1970 e 1980, foi o sistema *Navy Navigation Satellite System* (NNSS), conhecido como sistema TRANSIT. Essa tecnologia baseada em rádio navegação foi precursora do sistema GNSS e foi utilizada, predominantemente, na construção da rede geodésica na região Norte do Brasil.

No ano de 1988, foi executado o Projeto Translocação na Amazônia, voltado à compatibilização da metodologia anteriormente praticada (clássica) com o método TRANSIT (GODOY et al, 1991). A partir de 1991, ocorreu a adoção do *Global Positioning System* (GPS) nos levantamentos geodésicos planimétricos no Brasil. Evidentemente, com a inserção do GPS os levantamentos geodésicos passaram a ser mais rápidos, precisos e menos onerosos do que os levantamentos advindos do sistema TRANSIT e das tecnologias clássicas. As estações geodésicas estabelecidas com o uso de GPS nos anos 1990 deram origem à chamada rede nacional GPS que,

embora disponibilizasse coordenadas tridimensionais, ainda era considerada rede planimétrica, pois as altitudes fornecidas não atendiam, e até os dias atuais não atendem inteiramente, à grande parte das aplicações requeridas nas execuções de projetos de engenharia.

As vantagens em termos de produtividade e qualidade na obtenção de coordenadas, juntamente com a diversidade de aplicações possíveis com o GPS impulsionou o estabelecimento de redes estaduais na maior parte dos estados brasileiros, mediante parcerias entre instituições de ensino e pesquisa e o IBGE. Essas redes estaduais resultaram num importante adensamento da rede nacional GPS (SILVA et al. 2008). Atualmente, essa infraestrutura geodésica é denominada não mais de rede planimétrica, mas de rede planialtimétrica, pois possibilita a implantação de projetos considerando a altitude geométrica referente ao elipsoide.

Em paralelo à densificação da rede nacional GPS, aportou no cenário brasileiro uma concepção que ampliaria sobremaneira os horizontes do SGB, o conceito de rede geodésica ativa. A principal característica de uma estação ativa consiste num receptor GNSS rastreando satélites continuamente, de forma a determinar as coordenadas de um ponto geodésico. Tais estações possuem coordenadas altamente precisas associadas ao Referencial Planimétrico do SGB e os dados obtidos por esses equipamentos são disponibilizados aos usuários para fins de posicionamento geodésico. Em contrapartida, as demais estações do SGB, antigas e novas, sem a presença de instrumental agregado, passaram a receber a denominação de estações passivas. As redes ativas são adotadas na maioria dos países, destacando-se as iniciativas dos Estados Unidos, Canadá, Japão, Austrália, Dinamarca, França, Grécia, Suíça, Suécia, Polônia e Noruega (PEREIRA, 2003).

A rede ativa brasileira é representada pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). A RBMC, mantida pelo IBGE e mostrada através da Figura 3, é a principal infraestrutura geodésica ativa do país. Iniciou 2018 com 138 estações, sendo que dessas, 104 possibilitam correções de coordenadas em tempo real. Outras instituições vêm disponibilizando as respectivas redes ativas ao IBGE, com destaque ao Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A Figura 3 apresenta a distribuição das estações da RBMC.

**Figura 3 – RBMC**

**Fonte:** Adaptado de IBGE, 2017

Os resultados advindos do GPS, vinculados a um referencial geocêntrico e aliados ao desejável monitoramento de diversos fenômenos dinâmicos em âmbito global, tornaram indispensável o estabelecimento de referenciais mais precisos. Assim, em 1988, a comunidade científica criou o *International Earth Rotation Service* (IERS), hoje denominado *International Earth Rotation and Reference Systems Service*, que estabeleceu um sistema de referência terrestre denominado *International Terrestrial Reference System* (ITRS), cuja materialização é realizada por meio do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) (BLITZKOW, 2007).

A primeira realização do ITRS ocorreu em 1989 e foi denominada ITRF88, a mais atual realização é o ITRF2014. De acordo com Costa (2000), os dados do ITRF estão acessíveis à comunidade usuária desde 1994, por meio do International GPS Service (IGS), atual International GNSS Service. A partir do ITRS foram sendo

realizadas densificações desse sistema em vários continentes, tais como: o *European Reference Frame* (EUREF), o *North American Datum* (NAD-83) e o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000).

O projeto SIRGAS foi iniciado no ano de 1993 para a definição de um Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul como uma densificação continental do ITRF. A primeira realização do SIRGAS (SIRGAS95) refere-se ao ITRF94 e foi composta por 58 estações na América do Sul. No ano de 2000 uma nova realização foi disponibilizada contando com dados da América do Sul e de países do Caribe, América Central e do Norte. A sigla inicial SIRGAS passou a se referir ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. A segunda realização foi denominada de SIRGAS2000 e contou com 184 estações GPS com coordenadas referidas ao ITRF2000 na época 2000,4, sendo 21 localizadas em território brasileiro. A terceira e última realização do SIRGAS é traduzida por um conjunto de estações GNSS ativas na América Latina, denominada de Rede SIRGAS de Operação Contínua (SIRGAS-CON). A Rede SIRGAS-CON conta atualmente com uma infraestrutura de cerca de 400 estações ativas abarcando mais de 50 instituições colaboradoras (SIRGAS, 2015). No Brasil, participam da rede SIRGAS-CON todas as estações pertencentes à RBMC.

Nesses últimos anos o SIRGAS vem se consagrando enquanto referência científica e posicional, consolidando aplicações inerentes ao GNSS e sendo a realização do ITRF nas Américas do Sul e Central. Diferentemente do SAD69, que era materializado por apenas um ponto, o SIRGAS é materializado por uma rede de pontos de abrangência continental, que são continuamente monitorados com o intuito de se considerar as derivas e deformações das placas tectônicas americanas ao longo do tempo (SIRGAS, 2015).

Embora a tecnologia atual concernente ao GNSS garanta coordenadas tridimensionais com excelente precisão, possibilitando inclusive a recente designação de rede planialtimétrica, os resultados altimétricos disponibilizados pela RBMC ainda não consideram os aspectos físicos requeridos em uma boa parte das aplicações geodésicas.

### **2.3 O Contexto Altimétrico**

Em termos geodésicos, um correto posicionamento sobre a superfície física da Terra requer informações de caráter tridimensional. Assim, à parte das coordenadas

planimétricas, retratadas pela latitude e longitude, faz-se necessária alguma grandeza que mencione o seu afastamento vertical com relação a alguma superfície de referência: a altitude.

No Brasil, o atual Sistema Vertical de Referência Nacional (SVRN) vem sendo estruturado sistematicamente desde o ano de 1945, quando ocorreram as primeiras atividades altimétricas, desenvolvidas pelo IBGE. Isso transcorreu no interior do estado de Santa Catarina, por conta da implantação da denominada Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) (LUZ, 2008). O SVRN brasileiro é composto basicamente por duas Redes de Referência Vertical: a RAAP traduz a rede altimétrica passiva e as estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodesia (RMPG), representam a rede altimétrica ativa.

Ao contrário do que se passou com os levantamentos planimétricos, ao longo do tempo não ocorreram mudanças significativas da sistemática empregada nas medições altimétricas de alta precisão, tanto no Brasil, como em âmbito mundial. Mesmo diante do avanço tecnológico, é curioso mencionar que o procedimento mais indicado para determinações altimétricas ainda é o nivelamento geométrico, cujos princípios metodológicos e instrumentais continuam praticamente os mesmos desde a metade do século passado. Quanto ao instrumento de medição, a grande novidade no Brasil ocorreu em 2015, no estabelecimento da RAAP, com a inserção do nível eletrônico em gradativa substituição ao tradicional nível ótico.

Nos mais de setenta anos de atividades altimétricas empreendidas na RAAP, cerca de setenta mil estações de referência de nível altimétrico (RRNN) foram implantados nas margens das principais estradas do Brasil, perfazendo algo próximo a 185.000 km de extensão. O arcabouço altimétrico nacional traduzido pela RAAP possui duas origens, ou dois *data* verticais, a partir dos quais são calculados os desníveis entre as inúmeras seções que compõem a rede. Ambos os *data* são vinculados a estações maregráficas. Desde 1959 a origem principal, e com maior abrangência espacial, é o Datum Vertical Brasileiro de Imbituba (DVB-I), situado em Santa Catarina. Há ainda o Datum Vertical Brasileiro em Santana (DVB-S), destinado a apoiar a porção da RAAP existente no estado do Amapá (LUZ, 2008).

A Figura 4 apresenta uma visão sintética do esforço empreendido pelo IBGE no estabelecimento da RAAP em âmbito nacional. Percebe-se que ainda há uma considerável parcela do território desprovida de infraestrutura altimétrica. Isso acontece basicamente em regiões com rede viária deficiente, como é o caso da

Amazônia legal. Exceção à regra vem ocorrendo no Amapá, cujo arcabouço geodésico tem sido ampliado desde 2013, mas até hoje não está vinculado ao DVB-I. No ano de 2016 iniciaram-se os levantamentos voltados à interligação dos *data* Santana e Imbituba. Com isso, espera-se que brevemente toda a RAAP possa ter uma única origem e que seja contornada a impossibilidade prática de se atravessar o estuário do rio Amazonas com o nivelamento geométrico.

**Figura 4** – RAAP, com a inserção das novas linhas altimétricas implantadas no Amapá, a partir de 2013, alcançando a fronteira com a Guiana Francesa no Oiapoque



**Fonte:** Adaptado de IBGE, 2017

É importante considerar que alguns inconvenientes teóricos e práticos dificultam a desejável vinculação altimétrica de diversos projetos estruturais ao Sistema Geodésico Brasileiro.

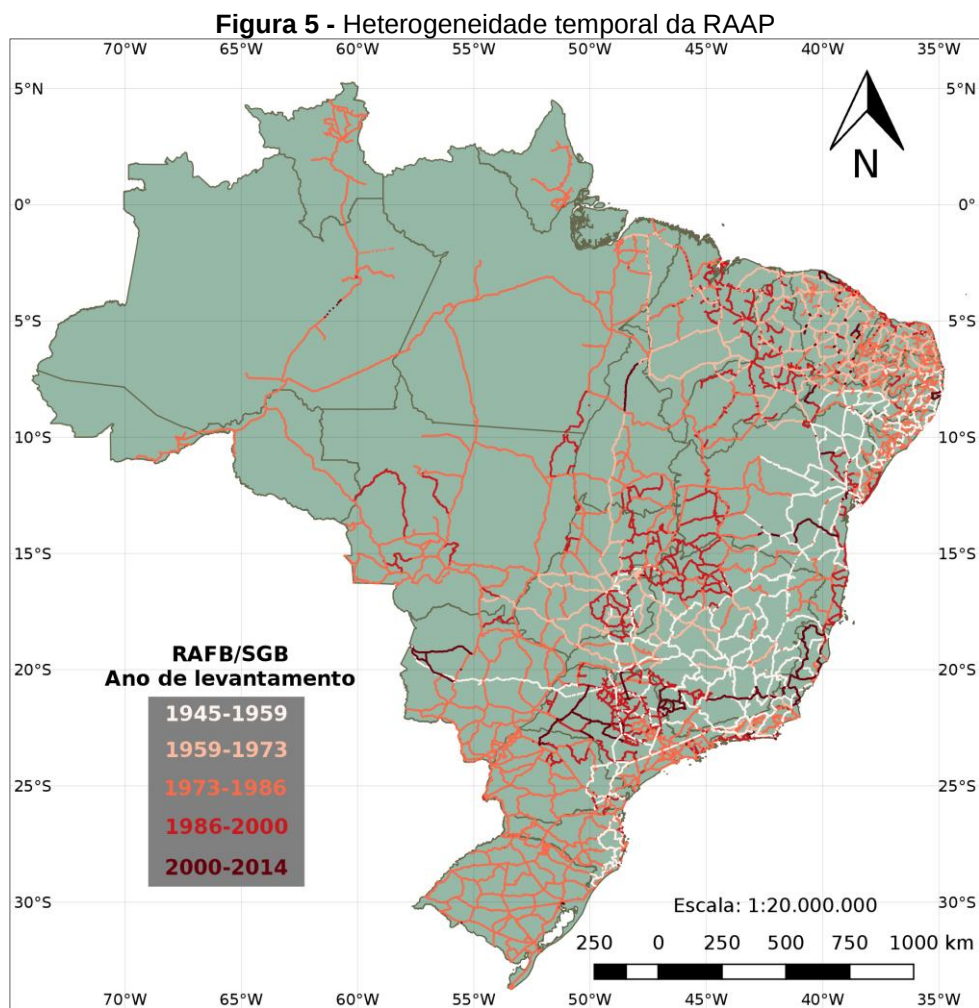
A primeira dificuldade, diz respeito aos imensos espaços sem informações altimétricas no país. Tal heterogeneidade traz uma dicotomia à realidade brasileira,

tendo em vista que as regiões mais carentes de informações altimétricas atualmente vêm recebendo os maiores aproveitamentos hidrelétricos, sendo ainda previstos muitos outros empreendimentos desse tipo para os próximos anos.

Outra questão desfavorável está correlacionada à morosidade e aos altos custos inerentes à implantação do nivelamento geodésico e consequentemente à RAAP, principalmente na região amazônica.

A terceira limitação da RAAP, de conotação mais científica, é resumida por Severo (2013), ao mencionar que a rede não corresponde aos requisitos modernos de posicionamento vertical. Ampliando esse raciocínio, Freitas & Blitzkow (1999) discorreram sobre as inconsistências geradas na RAAP e em outras redes altimétricas de países vizinhos, por ser efetuada apenas uma correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais, dificultando sobremaneira a integração altimétrica continental.

Uma quarta limitação, apontada por Luz (2008) e Nicacio Junior (2017), está relacionada à grande heterogeneidade temporal existente na medição de desníveis da RAAP. São dados obtidos em mais de 70 anos de levantamentos sem a devida observância aos movimentos das placas litosféricas nesse extenso período. A Figura 5 mostra esse quadro heterogêneo da RAAP retratando a periodicidade na realização dos levantamentos altimétricos, entre os anos de 1945 e 2014.



**Fonte:** Nicacio Junior, 2017

Para amenizar esse quadro de heterogeneidades altimétricas, o Grupo de Trabalho SIRGAS - GT III, em consonância com a IAG, preconizou a adoção de um sistema de altitudes normais em cada país, visando a posterior integração continental e, em última análise, a desejável abrangência global. Vindo ao encontro dessas propostas, Freitas & Blitzkow (1999) e Luz (2008), apontaram para a solução consensual de que o caminho para equacionar tais divergências consiste na integração entre a altimetria e a gravimetria.

Ainda em consonância com as recomendações voltadas às altitudes normais em âmbito continental, existe um consenso na comunidade científica internacional que preconiza um futuro Sistema Altimétrico Mundial, denominado *International Height Reference System* (IHRs). O IHRs levará em consideração o campo de gravidade terrestre e as informações dinâmicas disponibilizadas pelo GNSS, permitindo então a integração altimétrica em escala global (SANCHEZ et al., 2015).

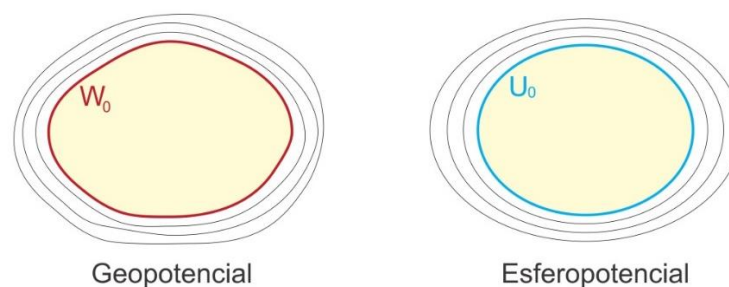
Considerando a necessidade de integração entre altimetria e gravidade, será realizada uma breve discussão a esse respeito a seguir, ponderando aspectos teóricos e práticos.

Há diferentes formas de se determinar altitudes, que variam em função da metodologia empregada e do tipo de altitude que se deseja obter. Dependendo das necessidades práticas e da precisão requerida, a Geodesia indica quais os métodos e tecnologias a serem empregados em mensurações altimétricas, implicando também na escolha criteriosa de uma superfície de referência. Nesse contexto, onde se busca alta precisão, torna-se imprescindível considerar o campo de gravidade terrestre atribuindo uma conotação física, e não apenas geométrica, às altitudes obtidas (BLITZKOW et al., 2004).

Para contextualizar o significado das grandezas físicas ou geométricas vinculadas às altitudes, se faz necessário expor o conceito de Terra normal, que é definida como sendo um elipsoide com mesma velocidade angular, mesma massa e concêntrico com a Terra real, onde o potencial  $U_0$ , constante em sua superfície, seja igual ao potencial  $W_0$  referenciado à Terra real (GUIMARÃES, 2011).

Tanto a Terra real como a Terra normal possuem infinitas superfícies equipotenciais do campo de gravidade denominadas geopes (*geopotential surfaces*) (TORGE, 2001). Os geopes descrevem superfícies de nível do campo de gravidade, onde o potencial é constante. De acordo com Pereira (2009), a configuração dos geopes depende do modelo adotado: na Terra normal, são figuras regulares também chamados de esferopes; enquanto que na Terra real, os geopes possuem forma irregular, traduzindo as diferentes distribuições de massas e de densidades da Terra. O não paralelismo dos geopes associados à Terra real decorre do achatamento terrestre e das irregularidades na distribuição de massas no interior da crosta (FREITAS & BLITZKOW, 1999). A Figura 6 ajuda a esclarecer tais características.

**Figura 6** – Superfícies equipotenciais da Terra real e Terra normal



**Fonte:** Adaptado de Gemaël, 1999

Outro importante conceito necessário à compreensão da questão altimétrica diz respeito ao número geopotencial. Observando-se a Figura 6 e, partindo-se do princípio de que há apenas um geope ( $W_i$ ) passante por um ponto ( $P_i$ ), depreende-se que o potencial de gravidade representa um caminho possível para definir uma única posição vertical de ( $P_i$ ). Cabe destacar que, a rigor, dois geopes têm de constante entre si a diferença de potencial e não a distância (BLITZKOW et al., 2004).

Segundo Vaníček & Krakiwisky (1986), ao invés de se usar o valor do potencial de gravidade para representar a posição vertical, é preferível considerar o número geopotencial ( $C$ ), que é a diferença de potencial de gravidade entre um ponto na superfície física e sua projeção na superfície geoidal, conforme apresentado na Equação 1:

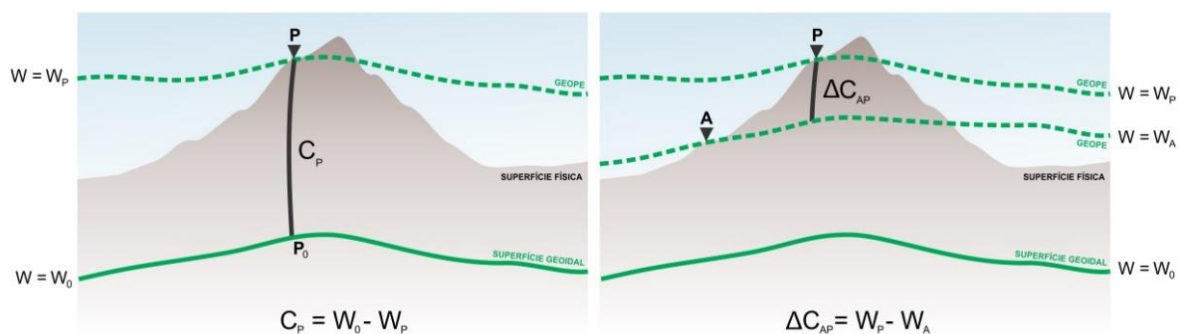
$$C_P = W_0 - W_P \quad (1)$$

Onde:

- $C_P$  é o número geopotencial para o ponto P;
- $W_0$  é o potencial da gravidade na superfície geoidal;
- $W_P$  é o potencial da gravidade no ponto P.

Outra forma de se definir o número geopotencial retrata o que ocorre na maioria das aplicações práticas, quando  $C$  é determinado a partir da diferença de potencial de gravidade entre um ponto na superfície física e outra referência local, também na superfície física. Trata-se da determinação relativa de  $C$ . A utilização prática dos números geopotenciais em desníveis entre dois pontos situados na superfície física é uma opção plausível, explica Luz (2008), desde que estes não estejam distantes entre si. A Figura 7 ilustra essas possibilidades de obtenção do número geopotencial.

**Figura 7** – Modalidades de representação e obtenção do número geopotencial



Fonte: O autor

O número geopotencial é uma grandeza física, vinculada ao campo de gravidade terrestre, e unívoca, pois sua determinação não depende do trajeto percorrido entre as superfícies equipotenciais (FERREIRA et al., 2011). Acrescentam Blitzkow et al. (2004), que o “fluxo natural de água é regido pelo campo de gravidade e não por condições geométricas”, por tal razão preconizam o uso de  $C$  nas grandes obras de engenharia, sobretudo nas aplicações que envolvem armazenamento e movimento de massas líquidas em grandes represas e canais extensos.

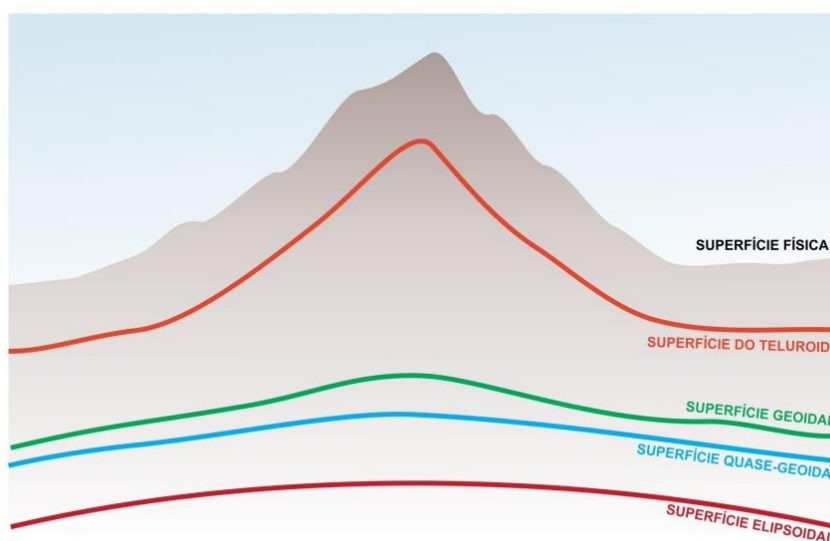
Entretanto, não é usual se adotar apenas  $C$  para representar a altitude, devido às unidades em que este pode ser expresso: kilokal x metro ou  $m^2/s^2$  (LUZ, 2008). Por tal razão, deve ser agregado a  $C$  um valor de gravidade, com vistas a representar um posicionamento vertical através de uma unidade métrica (SEVERO, 2013). Gemael (1999), acrescenta que esta desejável vinculação de  $C$  a alguma altitude se dá pela expressão geral das altitudes científicas, expressa por:

$$H^C = \frac{C}{G} \quad (2)$$

Onde:  $H^C$  representa genericamente uma altitude científica e  $G$  um valor particular da aceleração de gravidade que induzirá o tipo de altitude a ser obtida.

Com o objetivo de possibilitar uma melhor caracterização do tema e facilitar a compreensão das altitudes tratadas nesta tese, vale inserir o conceito das principais superfícies de referência altimétrica consideradas pela Geodesia, conforme se pode observar na Figura 8.

**Figura 8 – Principais superfícies de referência consideradas pela Geodesia**



Fonte: O autor

A superfície física da Terra é aquela limitante do relevo topográfico continental ou oceânico. É sobre ela que são realizadas as medições geodésicas (SÁ, 2001).

A superfície geoidal merece especial destaque. É considerada como sendo a superfície equipotencial que melhor se adapta ao nível médio não perturbado dos mares em um determinado instante (GUIMARÃES, 2011). Foi proposta originalmente por Listing, em 1873, como tendo “nível zero”, servindo assim de conveniente referência para as altitudes (SÁ, 2001). A superfície geoidal circunda o geoide que, apesar de apresentar suaves irregularidades advindas das diferentes densidades do interior da crosta, é tido como a forma da Terra em equilíbrio, ou mesmo, a verdadeira forma da Terra.

A superfície elipsoidal envolve um elipsoide de revolução e está associada à forma geométrica da Terra. De acordo com Torge (2001), o elipsoide de revolução foi idealizado por Newton como sendo uma figura de equilíbrio para uma Terra homogênea, fluida e em rotação. Desde então inúmeros elipsoides, com dimensões distintas, têm sido adotados pelos antigos e modernos sistemas geodésicos de referência, sempre na tentativa de encontrar aquele que melhor se adapte ao geoide em termos globais.

O teluroide pode ser definido como a superfície não equipotencial formada pelos pontos que possuem seus respectivos potenciais normais ( $U$ ) coincidentes com os potenciais verdadeiros ( $W$ ) dos pontos correspondentes situados na superfície física (SEVERO, 2013).

A superfície do quase geoide foi concebida por Molodenskii, em 1945, como sendo uma aproximação do geoide a fim de facilitar determinadas aplicações práticas. O quase geoide não é uma superfície equipotencial; seu afastamento com relação ao geoide é praticamente nulo próximo ao nível do mar, podendo alcançar valores maiores que um metro nas regiões montanhosas (TORGE, 2001).

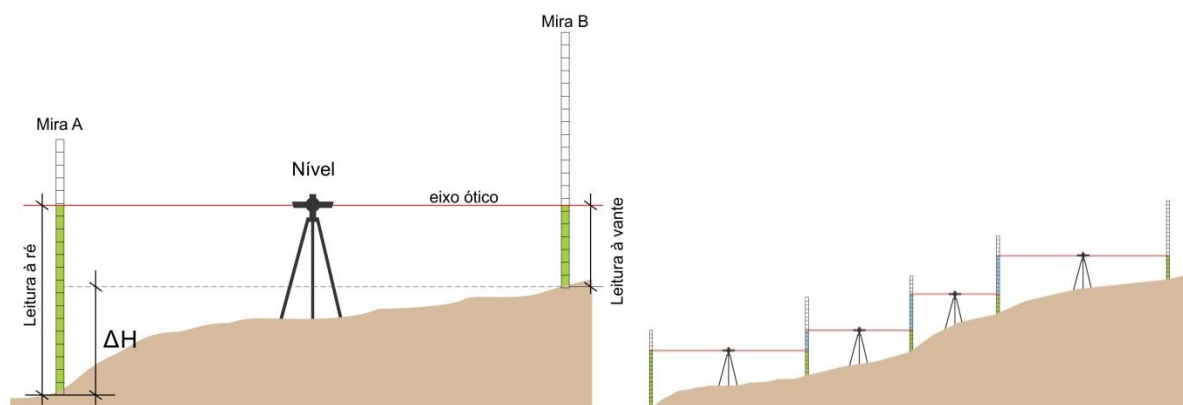
Uma forma de abordar o posicionamento geodésico altimétrico, apresentada por Drewes et al. (2002), pressupõe os diferentes tipos de altitudes: niveladas, ortométricas, elipsoidais, normais e dinâmicas. Por sua vez, Blitzkow et al. (2004) consideram as mesmas modalidades, porém classificando-as em duas categorias distintas de altitudes: geométricas, associadas apenas a grandezas métricas; e científicas, vinculadas ao campo de gravidade terrestre.

Dentre as modalidades de altitudes niveladas, a que mais se adequa aos objetivos geodésicos, e por isso a mais disseminada mundialmente, consiste no

nivelamento geométrico. Para que este procedimento produza altitudes com alta-precisão e possa ser considerado nivelamento geodésico, é preciso se levar em conta o instrumental, a sistemática de medição e as correções requeridas pela Geodesia (LUZ, 2008).

O transporte das altitudes no nivelamento geodésico é efetuado por meio da mensuração de desníveis, conforme mostrado pela Figura 9. No que tange às operações de medição, o instrumento básico é composto por um nível geodésico, de luneta ou digital, com precisão nominal de um décimo de milímetro, atuando em conjunto com um par de miras graduadas construídas com material indeformável<sup>6</sup>.

**Figura 9** – Princípio do nivelamento geométrico, tendo à esquerda a representação de um lance e, à direita, uma sucessão de lances, caracterizando um nivelamento composto



Fonte: O autor

Os desníveis são medidos por lances, com o nível situado numa posição centralizada entre as duas miras em cada lance, a fim de amenizar erros sistemáticos. Uma sucessão de lances origina uma seção de nivelamento, cuja extensão geralmente não ultrapassa os 3 km. Os extremos de cada seção são materializados por um marco altimétrico, também chamado no Brasil de Referência de Nível (RN). A um conjunto de seções sucessivas denomina-se linha de nivelamento. As altitudes de uma linha são obtidas pelo somatório dos desníveis advindos das diversas seções niveladas. O agrupamento de diversas linhas conectadas entre si permite o fechamento de circuitos de nivelamento. Por sua vez, os encadeamentos dos circuitos conformam as redes de nivelamento. Quando a abrangência da rede de nivelamento

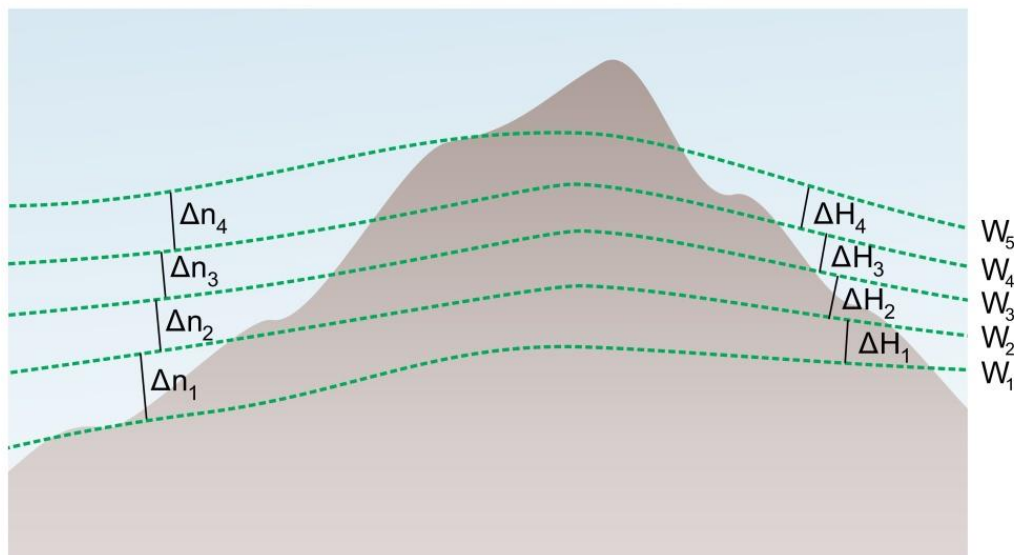
<sup>6</sup> Maiores informações sobre o nivelamento geométrico geodésico podem ser obtidas nas novas Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro ([ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf))

corresponde a um país, pode ser denominada Rede Vertical de Referência Nacional (RVRN).

É desejável que uma RN dê origem e encerre uma linha de nivelamento. Entretanto há circunstâncias em que não existe uma rede de referência altimétrica na região de trabalho; em função disso, para atender a eventuais demandas altimétricas em tais casos, esses marcos extremos da seção ou linha são dotados de altitudes aproximadas ou arbitrárias. Por se tratar de uma técnica meticulosa, diversos cuidados adicionais são requeridos durante as medições, fazendo com que os nivelamentos geodésicos sejam pouco produtores e onerosos.

Devido ao não paralelismo entre os geopes, as altitudes obtidas pelo nivelamento geodésico dependem do caminho percorrido, fazendo com que um determinado ponto na superfície física possa ter mais de um valor para a altitude nivelada associada (BLITZKOW, 2004). Por conta disso, o somatório dos desníveis medidos ( $\Delta n_i$ ) em extensas linhas de nivelamento, não será necessariamente igual à diferença de altitudes ( $\Delta H_i$ ) entre os extremos da linha, pois não consideram as influências do campo de gravidade terrestre e das irregularidades topográficas (SEVERO, 2013). A Figura 10 exemplifica essas questões.

**Figura 10** – Não paralelismo entre os geopes ( $\Delta n_i \neq \Delta H_i$ )



**Fonte:** O autor

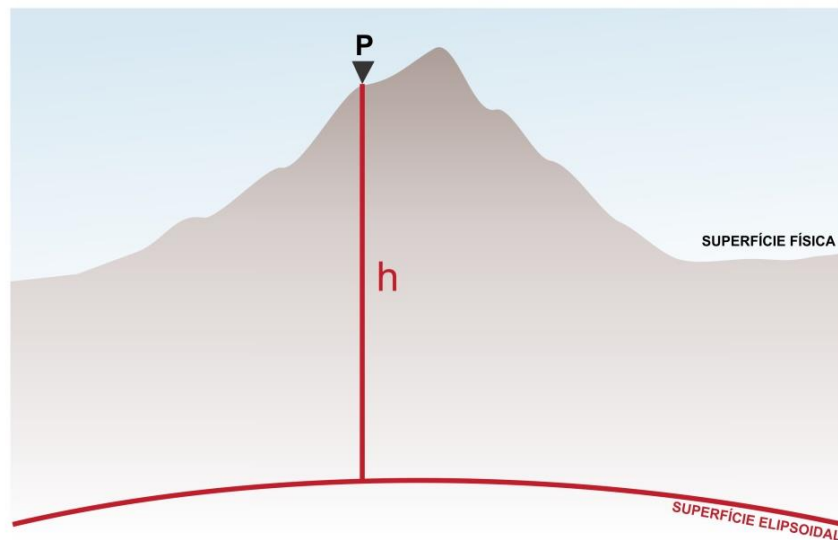
Para contornar esse problema do não paralelismo entre os geopes e atribuir um sentido físico às altitudes niveladas, deve-se agregar ao nivelamento geodésico

valores da aceleração de gravidade, tornando possível a determinação dos números geopotenciais. Na prática isso é obtido medindo-se a aceleração de gravidade ( $g$ ) em todas as RRNN da região a ser trabalhada. A partir desses procedimentos, cada RN terá valores de  $H$  e  $g$ . O cálculo dos números geopotenciais se dá a partir do produto do desnível entre as RRNN que compõem a seção e a gravidade média entre as mesmas.

A conceituação envolvida nas altitudes niveladas por nivelamento geodésico pressupõe o estabelecimento de uma origem, também denominada *datum* vertical, normalmente materializada por um ponto associado a um marégrafo. Há vários *data* verticais espalhados pelo mundo, servindo de origem às respectivas RVRN. Essas diferentes origens verticais dificultam a realização de empreendimentos transfronteiriços que requeiram informações altimétricas precisas e homogêneas.

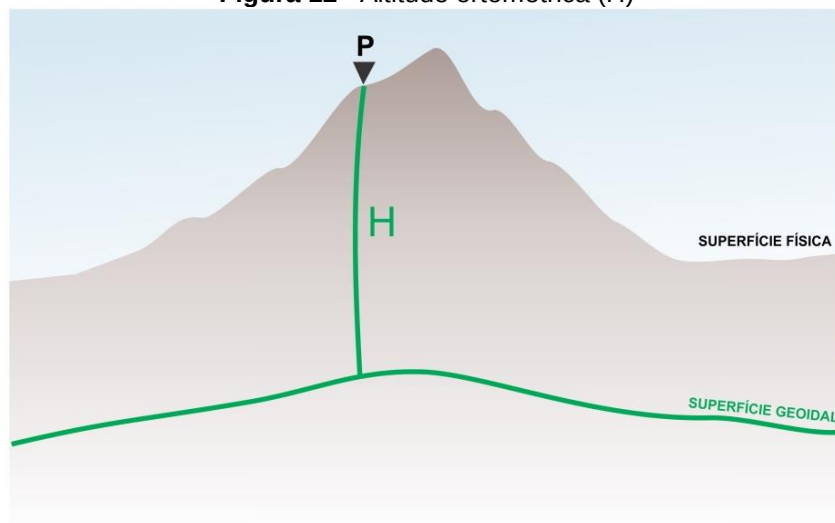
Complementando, vale destacar que há um equívoco conceitual que atribui genericamente às altitudes niveladas por nivelamento geodésico, pertencentes às RVRN, a denominação de altitudes ortométricas; essa tendência é mundial e também incide no Brasil. Dada à impossibilidade de se determinar altitudes ortométricas rigorosas, conforme será visto adiante, as altitudes pertencentes às RVRN poderiam ser chamadas de pseudo-ortométricas (GEMAEL, 1999), ou normais-ortométricas (LUZ, 2008).

A altitude geodésica, elipsoidal ou geométrica ( $h$ ), retrata a distância, entre um ponto situado na superfície física e seu correspondente na superfície elipsoidal de referência, conforme mostra a Figura 11; é medida ao longo de uma linha reta perpendicular ao elipsoide, chamada normal. Usualmente a obtenção de  $h$  é efetuada a partir das observáveis GNSS. Freitas & Blitzkow (1999), observaram que as altitudes geodésicas são importantes para avaliações temporais, embora não possuam vínculo com o campo de gravidade terrestre. Os mesmos autores argumentam ainda que podem ocorrer valores iguais de  $h$  em diferentes geopes, ou então, que em uma mesma superfície de geope, possa haver diferentes altitudes geodésicas.

**Figura 11 – Altitude geodésica (h)**

**Fonte:** O autor

A altitude ortométrica ( $H$ ) pode ser definida como sendo a distância vertical entre a superfície física da Terra e a superfície geoidal, conforme representação na Figura 12. É medida sobre uma vertical ao geoide. Apesar de a denominação sugerir equivocadamente a ideia de uma linha reta, a distância vertical possui uma leve curvatura, sendo perpendicular às infinitas superfícies equipotenciais entre a superfície física e geoidal (FREITAS & BLITZKOW, 1999). Isso ocorre porque a linha de prumo é tangente à direção da vertical que, por sua vez, varia em função da distribuição topográfica de massa e de densidade (VANÍČEK et al., 2003)

**Figura 12– Altitude ortométrica (H)**

**Fonte:** O autor

Um dos procedimentos que permitem a determinação teórica de uma altitude ortométrica, leva em conta os números geopotenciais, por meio da fórmula:

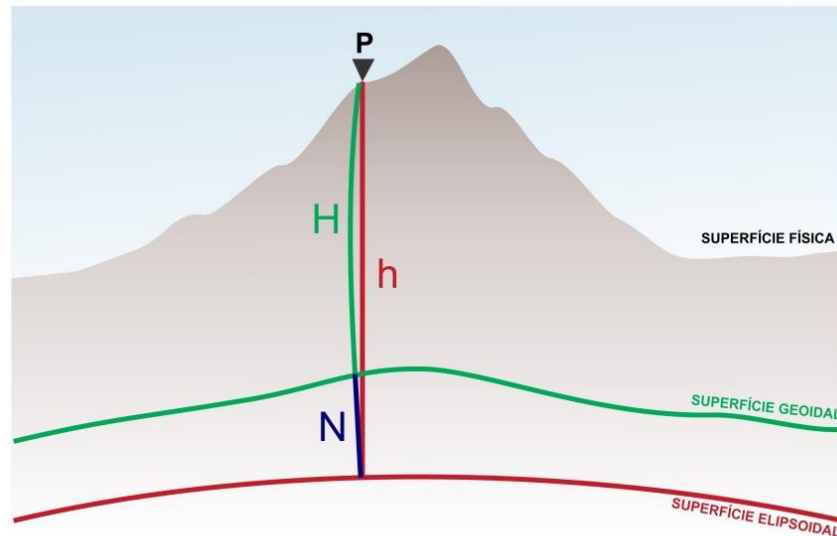
$$H = \frac{C}{\bar{g}} \quad (3)$$

Onde:  $\bar{g}$  é o valor médio de gravidade ao longo da vertical do ponto na superfície terrestre, até sua projeção sobre o geoide. Conforme menção anterior,  $C$  advém do nivelamento geodésico com informações gravimétricas. Embora seja um tipo de altitude muito conhecida, a altitude ortométrica possui um caráter eminentemente teórico, devido à impossibilidade de se conhecer o valor médio de gravidade entre as superfícies geoidal e física (DREWES et al., 2002). Entretanto, esse impasse pode ser amenizado adotando-se alguma hipótese simplificada sobre a estrutura da crosta e estimando-se um valor médio de gravidade a partir de  $g$ , medida na superfície física (PEREIRA, 2009). Dessas hipóteses diversas, uma das mais conhecidas é a de Helmert.

Outra maneira, bastante usual de se estimar a altitude ortométrica, conforme mostra a Figura 13, é por meio da altitude geométrica advinda do GNSS, juntamente com a utilização de modelos geoidais. Estes possibilitam o cálculo da ondulação geoidal ou altura geoidal ( $N$ ), caracterizada pela separação entre as superfícies geoidal e elipsoidal. Nos casos em que a superfície elipsoidal está abaixo da superfície geoidal o valor de  $N$  é positivo; em contrapartida, quando ocorre o contrário,  $N$  passa a ter sinal negativo.

Uma vantagem da obtenção de altitudes ortométricas por modelos geoidais é a alta produtividade, uma vez que a altitude geométrica é facilmente obtida por GNSS. Por outro lado, a qualidade da altitude obtida depende de um conjunto de dados gravimétricos suficiente para descrever o comportamento do geoide na região de interesse.

**Figura 13** – Correlação entre as altitudes ortométrica (H) e geodésica (h)



Fonte: O autor

A relação entre altitude ortométrica, altitude geométrica e a ondulação geoidal é dada pela Equação 4:

$$H \approx h - N \quad (4)$$

O sinal de aproximado é em razão da não colinearidade entre a vertical ao geoide, considerado pela  $H$ , e a normal ao elipsoide, donde provêm  $h$  e  $N$ . Em termos práticos, essa não colinearidade passa a ser desprezível, conforme explicação de Luz (2008).

O conceito de altitude normal tem o objetivo de contornar a problemática inerente à impossibilidade prática de se obter altitudes ortométricas verdadeiras. De acordo com Vaniček et al., (2003), as altitudes normais são uma aproximação das altitudes ortométricas, tendo como superfície de referência o quase geoide, substituindo-se a ondulação geoidal pela anomalia de altura.

Por não dependerem de hipóteses aproximadas sobre a estrutura da crosta, como ocorre nas ortométricas, as altitudes normais podem ser determinadas de maneira unívoca e a precisão das mesmas depende das precisões inerentes às medições dos desníveis, aos valores de gravidade medidos ou interpolados, à determinação da latitude e à fórmula de gravidade teórica empregada (RODRIGUEZ, 2003).

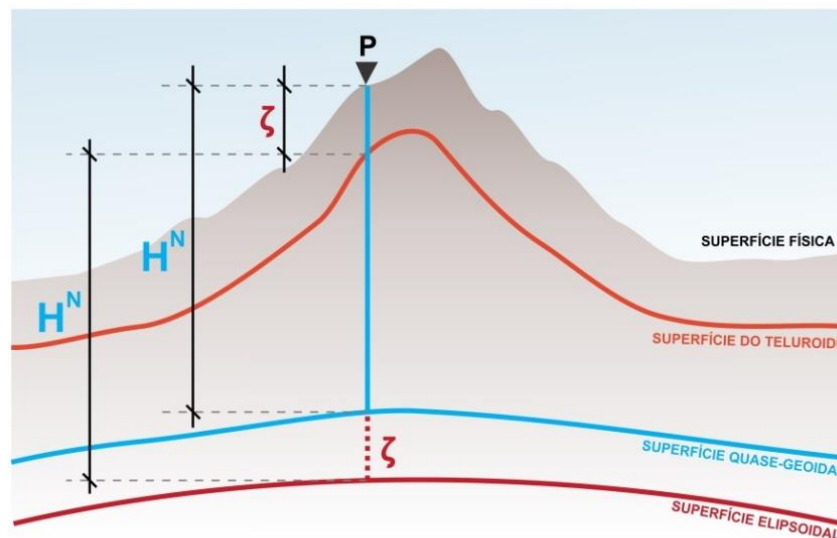
A expressão básica que permite o cálculo das altitudes normais ( $H^N$ ) considera, além do número geopotencial, o valor médio da gravidade normal ( $\bar{\gamma}$ ) sobre a linha normal entre o teluroide e o elipsoide de referência.

$$H^N = \frac{C}{\bar{\gamma}} \quad (5)$$

De acordo com Rodriguez (2003), o valor médio de gravidade normal  $\bar{\gamma}$  pode ser calculado por diversas fórmulas, destacando-se as de Molodenskii, Vignal e Bomford. Importante enfatizar que a determinação de  $\bar{\gamma}$  não requer o conhecimento da distribuição de densidades na crosta.

É possível correlacionar a altitude normal à altitude geodésica utilizando da anomalia de altura ( $\zeta$ ). Esta grandeza, denominada também anomalia de altitude, traduz a distância do teluroide à superfície física, ou ainda, a distância entre o quase geoide e o elipsoide, conforme mostra a Figura 14.

**Figura 14 – Altitude normal ( $H^N$ )**



**Fonte:** O autor

A determinação de  $\zeta$  pode ser obtida a partir da fórmula geral de Molodenskii (FREITAS & BLITZKOW, 1999). A relação entre a altitude normal à altitude geodésica é dada por:

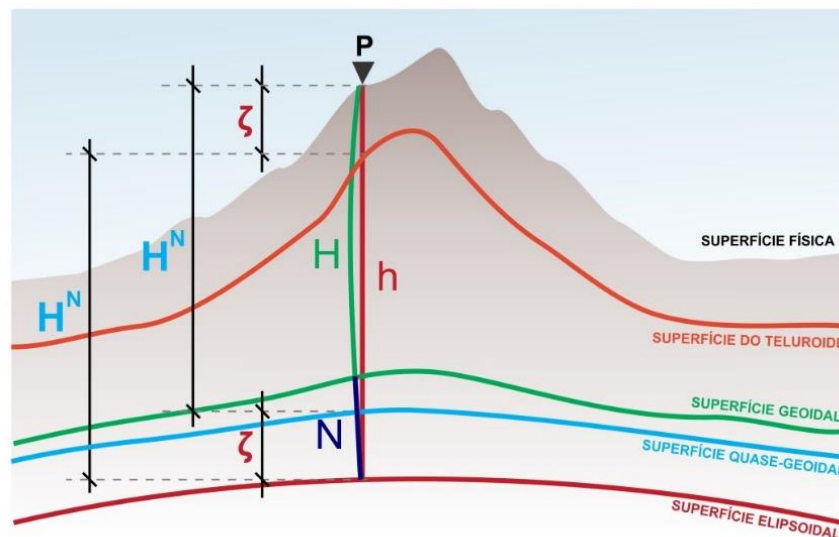
$$H^N \approx h - \zeta \quad (6)$$

Outra vantagem das altitudes normais diz respeito às possíveis formas de obtenção: por meio do nivelamento geodésico com gravimetria ou por GNSS. Na

primeira modalidade basta dividir o valor de  $C$  nas RRNN por  $\bar{\gamma}$ . O outro modo de se obter altitudes normais, por meio de receptores GNSS, pressupõe apenas a substituição da ondulação geoidal  $N$  pela anomalia de altura  $\zeta$ , que pode ser obtida a partir de um modelo quase geoidal. Atendendo às recomendações do comitê SIRGAS, as RRNN da RAAP deverão ter altitudes normais num futuro próximo.

Complementando este capítulo é possível visualizar, através da Figura 15, uma síntese das diferentes modalidades de altitudes apresentadas na contextualização desta tese, associadas às respectivas superfícies de referência.

**Figura 15** – Altitudes discutidas no contexto desta tese



Fonte: O autor

## 2.4 O Contexto Gravimétrico

A força de gravidade é um fenômeno universal e onipresente. Em nosso planeta, ocorre basicamente devido à atração das massas terrestres e da força centrífuga advinda da rotação da Terra (DEHLINGER, 1978). A maneira prática de se medir a força de gravidade é através da aceleração de gravidade ( $g$ ). A unidade comumente empregada para representar os valores de  $g$  é o “Gal”, acrônimo em homenagem a Galileu Galilei, cujos submúltiplos são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Unidades de medida de  $g$

| NOME     | SÍMBOLO  | EQUIVALÊNCIA              |
|----------|----------|---------------------------|
| Gal      | Gal      | $1\text{cm} / \text{s}^2$ |
| Miligal  | miliGal  | $10^{-3}$ Gal             |
| Microgal | microGal | $10^{-6}$ Gal             |

Fonte: O autor

A técnica que se incumbe precipuamente do estudo e da determinação da gravidade é denominada Gravimetria. Etimologicamente gravimetria significa medida de um peso. Pode ser definida como sendo o conjunto de técnicas e procedimentos voltados ao estudo da aceleração de gravidade (CASTRO JUNIOR, 2005). Por sua vez, Coyago (2010), define Gravimetria como a ciência que estuda as variações do campo de gravidade.

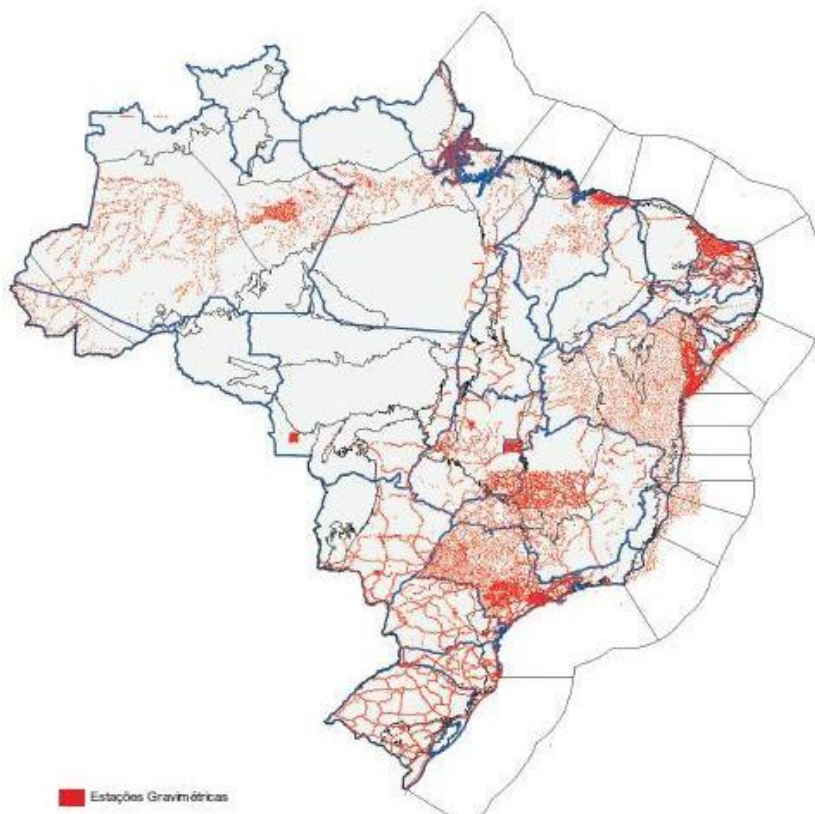
No Brasil a gravimetria é uma atividade que vem sendo conduzida por várias organizações desde o final do século XIX. A instituição brasileira pioneira nas atividades gravimétricas é o Observatório Nacional (ON); em 1851 foram empreendidas as primeiras medições. Ao longo dos tempos, o ON foi atualizando seu aparato tecnológico para medições gravimétricas e, em 1978, passou a ser responsável pela implantação e manutenção da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB). No ano de 2015 o a RGFB era composta por cerca de 620 estações materializadas em grande parte do território nacional. Em termos gravimétricos essa é a missão mais importante do ON, pois suas informações, disponibilizadas gratuitamente pela Internet, propiciam um arcabouço de referência aos levantamentos conduzidos no Brasil e em países fronteiriços (SOUSA, 2015).

Em paralelo à implantação da RGFB, o ON estabeleceu em meados dos anos 1980, uma linha de calibração gravimétrica na região de Itatiaia, estado do Rio de Janeiro. Este circuito é composto por cinco pontos criteriosamente materializados a fim de possibilitar a calibração de gravímetros mecânicos por meio da variação altimétrica das estações. Entre 2010 e 2011 a RGFB foi adensada com novas estações insulares, mais precisamente em Fernando de Noronha e no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Em 2015 foi a vez da Ilha de Trindade. Essas operações contaram com o apoio da Marinha Brasileira (ON, 2015).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) também tem importante contribuição na gravimetria nacional. No ano de 2009 a ANP, com o apoio da comunidade científica, tomou a iniciativa de criar o Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG), com o objetivo de consolidar a base gravimétrica nacional, deixando-a prontamente acessível para cumprir as metas geocientíficas brasileiras (GEOFÍSICA BRASIL, 2015). Esse acervo de dados, composto inicialmente por 80 mil estações gravimétricas, passou a abrigar informações oriundas de diversas entidades públicas, dentre as quais se destacam a Petrobras, Sociedade Brasileira da Geofísica (SBGf), Universidades, Institutos de Pesquisa e IBGE.

O BNDG possui atualmente cerca de cem mil estações. Seu conjunto de dados, visualizado na Figura 16, encontra-se disponível por meio do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP), também pertencente à ANP (RIBAMAR, 2015).

**Figura 16 – Acervo do BNDG**



**Fonte:** <<http://geofisicabrasil.com>>, 2015

A anteriormente denominada Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), também dispõe de um arcabouço gravimétrico que começou a ser produzido no final dos anos 1970, inserido no Projeto Levantamento Gravimétrico do Estado da Bahia, com base em levantamentos gravimétricos terrestres (GOMES & MOTTA, 1980). A partir de 2003, já com a atual denominação de Serviço Geológico Nacional, a CPRM deu início à renovação de seus equipamentos. Visando o mapeamento geológico e a prospecção de recursos minerais, a CPRM vem coordenando vários levantamentos aerogravimétricos em diversas partes do Brasil (PINTO, 2015).

Algumas universidades brasileiras têm importante contribuição para a gravimetria nacional, dentre elas destaca-se a Universidade Federal do Paraná (UFPR), que participou em 1971 da implantação da primeira rede gravimétrica

mundial, a IGSN71<sup>7</sup> (FREITAS, 2015). Além de pioneira na formação de profissionais de Ciências Geodésicas para todo o Brasil, a UFPR participou de vários levantamentos gravimétricos na região sul do Brasil.

Da mesma forma, cabe especial menção à Universidade de São Paulo (USP). Há duas vertentes que trabalham com gravimetria na USP. A mais antiga é a que possui correlação com a questão geofísica, por meio do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG-USP). Concomitantemente, a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), tem importante contribuição na pesquisa, formação de recursos humanos e levantamentos gravimétricos no Brasil. Além dos esforços voltados às operações em campo, importantes contribuições acadêmicas para o contexto geodésico brasileiro foram realizadas pela equipe da EPUSP. Lobianco (2005) desenvolveu uma metodologia para sistematizar e calcular alturas geoidais e, a partir daí versões atualizadas do modelo geoidal brasileiro vêm sendo processadas pela USP. Foram elaborados procedimentos voltados à implementação de um Modelo Digital do Terreno (MDT) a nível continental (MATOS, 2005; MATOS & BLITZKOW, 2008), bem como aprimorado o cálculo de modelos geoidais regionais e continentais (MATOS et al., 2012). Como exemplo mais recente, o MAPGEO2015 (BLITZKOW et al., 2016), é resultado de um trabalho em conjunto com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O IBGE vem atuando com gravimetria, não somente no Brasil, mas em vários países da América do Sul, principalmente após a implementação do SIRGAS. Um dos objetivos dos levantamentos gravimétricos vai ao encontro da proposição do Grupo de Trabalho III do SIRGAS, que propôs a adoção de um arcabouço altimétrico homogêneo para o continente, denominado Sistema Vertical SIRGAS (SVSIRGAS). O SVSIRGAS seria definido por meio de dois conjuntos de altitudes: geométricas, advindas do GNSS, e físicas, a partir da inserção da componente gravimétrica em conjunto com o nivelamento geodésico (SIRGAS, 2005; LUZ, 2008; IBGE, 2015). Com base nessas premissas o IBGE estabeleceu o Projeto Macro Circuitos, que agregava informações gravimétricas às altimétricas, em circuitos da RAAP estrategicamente selecionados, objetivando a materialização do SVSIRGAS em terras brasileiras e futuras conexões com os países fronteiriços. Em paralelo, o IBGE estabeleceu como

---

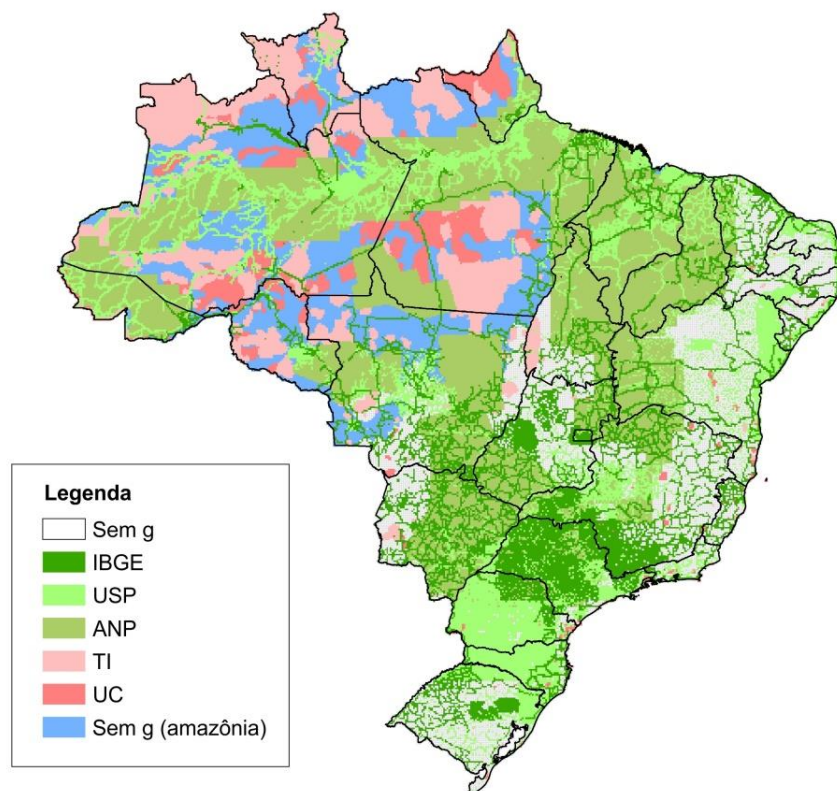
<sup>7</sup> Aspectos referentes à IGSN71 podem ser obtidos em Morelli et al. (1971)

diretriz para seus levantamentos gravimétricos as novas linhas de nivelamento geométrico (LUZ, 2008).

Atualmente o IBGE é a instituição que mais produz levantamentos gravimétricos com objetivos geodésicos no Brasil e possivelmente no continente. Além disso, exerce papel de liderança junto a diversos países da América do Sul, capacitando profissionais e auxiliando no desenvolvimento das respectivas redes nacionais de gravidade.

Os esforços de todas essas instituições fizeram com que, atualmente, o Brasil tenha uma rede gravimétrica com mais de 947000 pontos, conforme se pode observar na Figura 17.

**Figura 17** – Panorama gravimétrico multi-institucional brasileiro, onde são destacadas as áreas que não dispõem de cobertura gravimétrica terrestre, com ênfase às Terras Indígenas (TI) e Unidades de Conservação (UC)



**Fonte:** Adaptado de Nunes, 2015

## 2.5 Geodesia Espacial

É praticamente unânime a premissa de que a Geodesia contemporânea adveio da era espacial, proporcionando uma gradativa revolução nos conceitos e a quebra

de diversos paradigmas. Assim, aliada à evolução das tecnologias espaciais e ao crescente desenvolvimento da eletrônica e informática, a ciência geodésica experimentou, em meados do século XX, mais uma subdivisão, em total consonância com seus objetivos atuais: a Geodesia Espacial, Celeste ou Orbital.

Essa etapa começou em outubro de 1957, em meio às atividades do Ano Geofísico Internacional, com o lançamento do primeiro satélite artificial o SPUTNIK I (GUIMARÃES, 2010). Patrocinado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), o Ano Geofísico Internacional transcorreu entre 1957 e 1958, envolvendo diversas nações e milhares de cientistas voltados às pesquisas em Geociências.

Em paralelo à necessidade de absorção das novas tecnologias espaciais, os desafios daqueles primeiros geodestas contemporâneos foram direcionados à unificação dos inúmeros sistemas de referências então existentes, visando o estabelecimento de sistemas globais de referência. Esse processo evolutivo foi iniciado pela geometria ótica, onde câmeras instaladas em observatórios terrestres fotografavam satélites artificiais iluminados pelo Sol. Os satélites ECHO 1, ECHO 2 e PAGEOS fizeram parte dessa etapa, possibilitando enlaces geodésicos intercontinentais e gerando os primeiros modelos do campo de gravidade terrestre e de densidade da alta atmosfera (BARLIER & LEFEBVRE, 2001). A Figura 18 exhibe exemplos de câmeras que faziam esse rastreamento ótico de satélites.

**Figura 18 – Câmeras para rastreamento ótico de satélites**

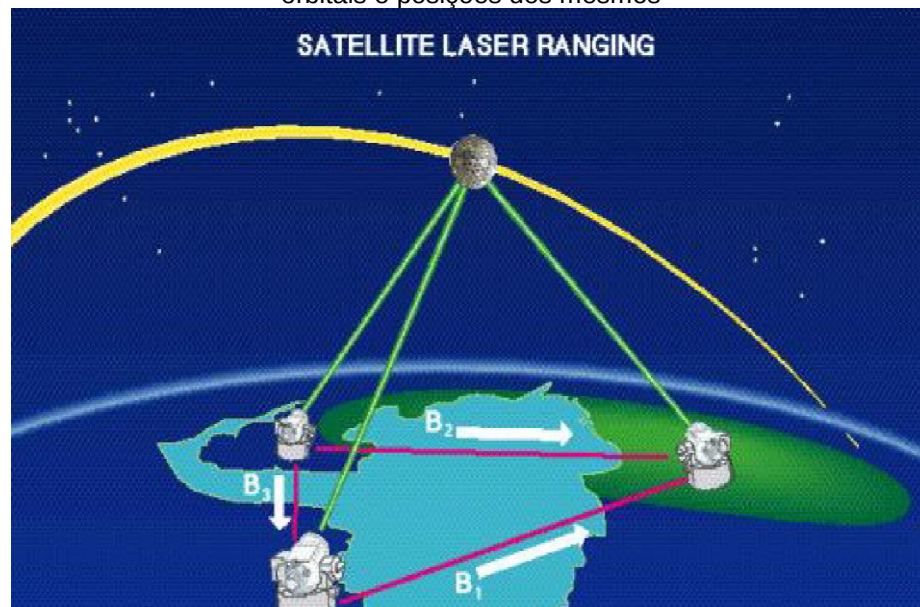


Fonte: Guimarães, 2017

Em seguida vieram as experimentações que possibilitaram a determinação precisa da distância entre uma estação terrestre e um satélite artificial, utilizando a

tecnologia denominada *Satellite Laser Ranging* (SLR), apresentada esquematicamente na Figura 19, cujo marco inicial foi o lançamento do satélite Bacon Explorer 22-B, em 1964. Os satélites vinculados ao SLR são munidos de dispositivos refletores especiais que são rastreados por telescópios que emitem feixes de laser, instalados em estações de controle. O tempo gasto nos percursos de ida e volta desses feixes permite, ainda hoje, a determinação precisa das posições e órbitas dos satélites monitorados (NASA, 2015).

**Figura 19** – Princípio do Sistema SLR. As estações de controle ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ) emitem feixes de laser aos dispositivos refletores instalados nos satélites, permitindo monitorar com exatidão as oscilações orbitais e posições dos mesmos



Fonte: <[http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/2006/degnan\\_0603.pdf](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/2006/degnan_0603.pdf)>

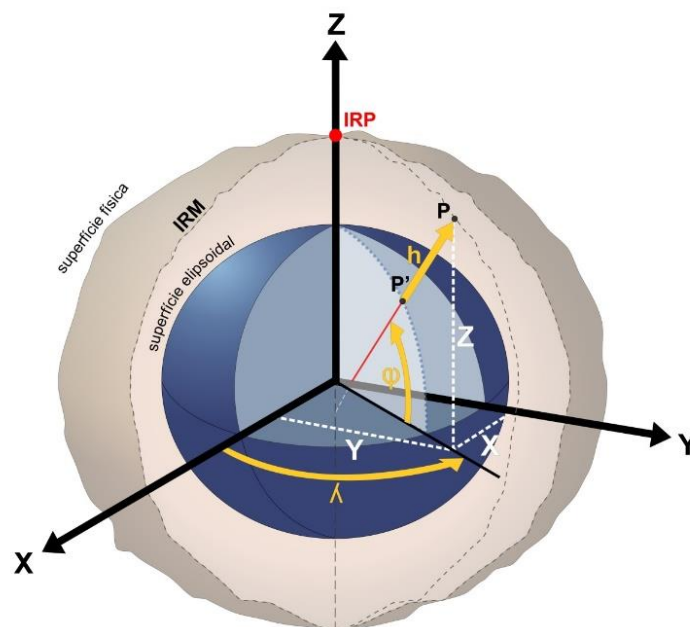
A técnica SLR evoluiu e é utilizada até os dias atuais. Dois satélites da série LAGEOS, construídos especificamente para serem usados pelo sistema SLR e que não possuem instrumentos a bordo, embarcam um conjunto de 426 refletores instalados numa esfera metálica de sessenta centímetros de diâmetro. De acordo com a NASA (2015), a técnica SLR foi utilizada para monitorar mais de sessenta satélites artificiais e vem contribuindo significativamente para estudos correlacionados ao planeta Terra.

No final da década de 1960 surgiram os métodos de rastreamento por radiofrequência, quando sobressaiu o sistema TRANSIT, antecedendo os futuros sistemas satelitais de posicionamento. O advento do TRANSIT deu início à integração das tradicionais componentes planimétrica e altimétrica, que eram tratadas

separadamente pela geodesia clássica. Isso só foi possível, de acordo com Barlier & Lefebvre (2001), porque a posição do centro de massa da Terra pôde ser redefinida e as coordenadas cartesianas geocêntricas ( $X, Y, Z$ ) advindas dos satélites artificiais, puderam ser transformadas em coordenadas geodésicas, latitude, longitude e altitude ( $\varphi, \lambda, h$ ), referenciadas a um elipsoide de revolução. Consequentemente, conforme menção anterior, agregando-se informações gravimétricas às altitudes geodésicas, houve condições de se determinar alguma altitude física, referenciada ao geoide ou quase geoide.

A Figura 20 mostra os sistemas curvilíneo e cartesiano terrestre. As coordenadas cartesianas tridimensionais têm como origem o centro de massa da Terra. O eixo  $X$  aponta para a intersecção entre o plano equatorial e o meridiano internacional de referência (IRM, *International reference Meridian*). O eixo  $Y$  aponta para a intersecção do plano equatorial com a longitude  $90^\circ$  E, formando um sistema dextrogiro. Finalmente, o eixo  $Z$  aponta para o polo norte internacional de referência (IRP, *International Reference Pole*).

**Figura 20** – Coordenadas cartesianas tridimensionais ( $X, Y, Z$ ) e coordenadas curvilíneas geodésicas ( $\varphi, \lambda, h$ )



Fonte: O autor

Durante os anos de 1970, surgiu o sistema de posicionamento NAVSTAR-GPS, conciliando abrangência global à precisão e acessibilidade à comunidade usuária. Naquela mesma época a então União Soviética concebia o sistema GLONASS

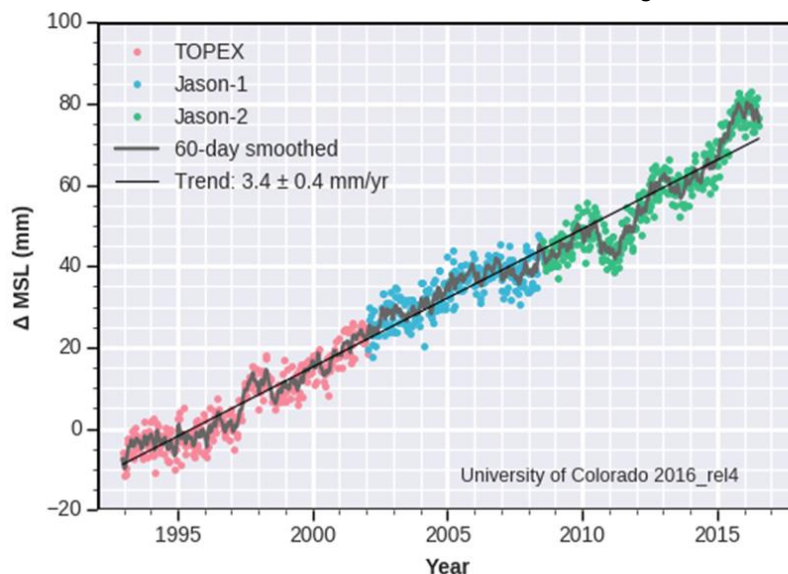
(*GLobalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*). Esses dois projetos preconizaram o desenvolvimento de futuros sistemas de posicionamento em distintas partes do planeta, dando origem, a partir de 1991, ao Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), que vem sendo cada vez mais empregado por inúmeros segmentos da comunidade usuária internacional.

Com o passar do tempo e a decorrente consagração do GNSS, também deixou de fazer sentido a premissa de que apenas pontos estáticos sobre a superfície física terrestre poderiam ter coordenadas precisas, pois a era espacial estendeu aos objetos se movimentando em terra firme, massas d'água, camadas atmosféricas e espaço sideral, a possibilidade de terem as suas posições estimadas com precisão. Atualmente inúmeras aplicações geocientíficas provem do GNSS, com importante ênfase na realização de referenciais geodésicos.

Em paralelo aos sistemas satelitais de posicionamento houve um enfoque específico na altimetria satelital. Visando precipuamente a estudos oceanográficos, essa tecnologia teve seu início com a instalação de um radar altimétrico na estação espacial SKYLAB, em 1973. O primeiro satélite dedicado exclusivamente à altimetria foi o GEOS-3 que utilizava tanto a tecnologia de rastreamento a laser como a emissão de sinais de rádio sujeitos ao efeito *doppler* para o cálculo de sua órbita. Segundo Barlier & Lefebvre (2001), o advento da altimetria satelital ampliou o diálogo entre oceanógrafos, geofísicos e geodestas, tendo em vista que os resultados auferidos pelos diversos satélites abrangem, além das dinâmicas oceânicas e da criosfera, o campo de gravidade e o posicionamento preciso.

Os projetos altimétricos satelitais possibilitaram também a aplicação de novas técnicas, empregadas posteriormente em importantes missões espaciais, com ênfase nos acelerômetros, utilizados para medir as interferências não gravitacionais sobre os satélites. O gráfico contido na Figura 21 permite constatar a tendência de elevação do nível médio dos oceanos, ao longo de mais de vinte anos de observações de três satélites altimétricos.

**Figura 21** – Variação do nível médio dos mares com base em informações satelitais. No decorrer de mais de 20 anos o nível médio dos oceanos vem subindo alguns milímetros por ano



**Fonte:** Universidade do Colorado (2016), apud Guimarães (2017)

No contexto evolutivo das técnicas espaciais, há que se destacar o sistema francês denominado *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS), concebido precipuamente para determinação precisa, rápida e automatizada das órbitas baixas satelitais (GGOS, 2016). Esse sistema, originado na década de 1990 e composto atualmente por cerca de 60 estações de controle, vem desempenhando um importante papel em diversas missões espaciais, conforme mostra a Tabela 2. Adicionalmente o sistema DORIS contribui com a IAG no estabelecimento do ITRS e, a partir de 2003, disponibilizou à comunidade científica o *International DORIS Service* (IDS - <<http://ids-doris.org/>>).

**Tabela 2** – Satélites rastreados pelo sistema DORIS

| The DORIS satellites list |         |            |             |
|---------------------------|---------|------------|-------------|
| Name                      | Cospar  | Launch     | Mission End |
| SENTINEL-3A               | 1601101 | 2016-02-16 | -           |
| JASON-3                   | 1600201 | 2016-01-17 | -           |
| SARAL                     | 1300901 | 2013-02-25 | -           |
| HY-2A                     | 1104301 | 2011-08-15 | -           |
| CRYOSAT-2                 | 1001301 | 2010-04-08 | -           |
| JASON-2                   | 803201  | 2008-06-20 | -           |
| STPSat-1                  | 700604  | 2007-03-09 | 2009-10-07  |
| SPOT-5                    | 202101  | 2002-05-04 | 2015-12-11  |
| ENVISAT                   | 200901  | 2002-04-01 | 2012-05-09  |
| JASON-1                   | 105501  | 2001-12-07 | 2013-06-21  |
| SPOT-4                    | 9801701 | 1998-03-24 | 2013-06-24  |
| SPOT-3                    | 9306101 | 1993-09-26 | 1996-11-14  |
| TOPEX/POSEIDON            | 9205201 | 1992-08-10 | 2005-10-09  |
| SPOT-2                    | 9000501 | 1990-01-22 | 2009-07-29  |

**Fonte:** <<http://ids-doris.org/>>

Devido aos incontáveis fenômenos identificados pelas técnicas espaciais, que comprovaram o comportamento dinâmico do Sistema Terra, houve a necessidade de se adotar referenciais compatíveis que permitissem o adequado monitoramento do planeta e fossem devidamente fundamentados pela Teoria da Relatividade Geral. Assim, a comunidade científica concluiu, após décadas de investigação, da conveniência de dois novos referenciais para o planeta, um celeste e outro terrestre, (BLITZKOW & MATOS, 2005).

De acordo com Monico (2008), o Referencial Celeste (RC), denominado *International Celestial Reference System* (ICRS), tem origem no baricentro do sistema solar e é materializado através das coordenadas uranográficas dos quasares, tradução de *Quasi-Stellar Radio Source* (Quasars), que são objetos extragalácticos tão distantes da Terra que podem ser considerados fixos no espaço. As direções dos quasares são determinadas com extrema acurácia pela técnica denominada de *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI).

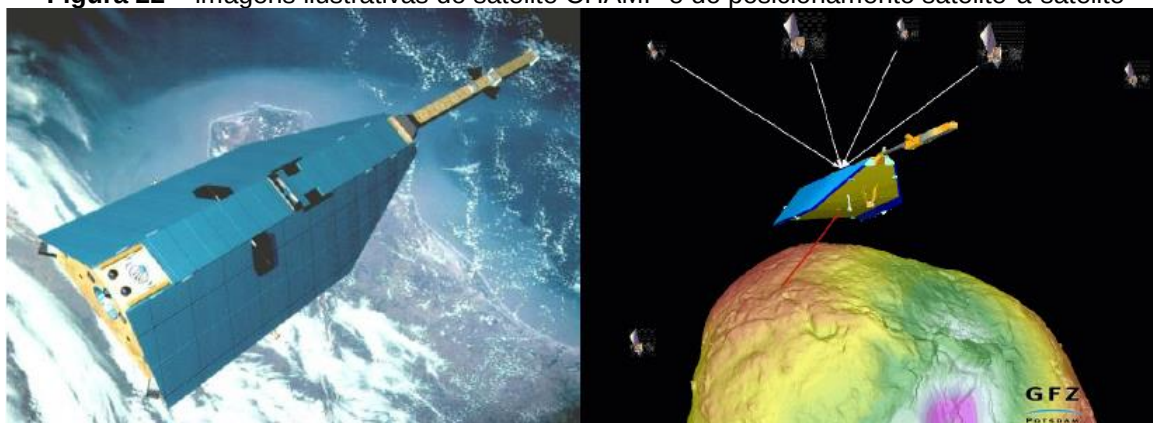
Integrando a chamada “Década internacional dos Geopotenciais” as modernas missões espaciais ainda têm relevante papel no detalhamento minucioso do campo gravitacional terrestre. A principal vantagem dos dados advindos exclusivamente desses satélites fica por conta da homogeneidade dos mesmos, evitando soluções deterioradas por informações terrestres imprecisas ou pouco acuradas, além de mal distribuídas (LOBIANCO, 2005).

As três missões principais que protagonizaram esta fase tiveram metas prioritárias específicas. De acordo com Blitzkow (2017), a missão CHAMP tinha a incumbência de estudar o campo magnético terrestre e suas variações; por outro lado, a missão GRACE pretendia um enfoque prioritário do campo gravitacional da Terra e suas variações temporais, enquanto que o projeto GOCE objetivava principalmente analisar o comportamento dos oceanos. Entretanto, os expressivos resultados disponibilizados por cada missão fizeram com que as conclusões auferidas se tornassem convergentes.

A missão CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload*), de origem alemã, foi uma missão para pesquisas atmosféricas e geocientíficas. Durante cinco anos, a partir de seu lançamento, em julho de 2000, a missão esteve em órbita a uma altitude inicial de 454 km, próxima ao ciclo polar. Com o decorrer da missão a altitude foi sendo diminuída para 300 km (LOBIANCO, 2005). Foi a primeira vez que um satélite em baixa altitude de órbita contou com receptores GPS, permitindo que o seu

posicionamento ocorresse satélite-a-satélite, com a precisão de poucos centímetros (SCHWINTZER; REIGBER, 2002). Esses sinais GPS possibilitaram o monitoramento continuado das perturbações da órbita do satélite. A Figura 22 apresenta ilustrações do satélite CHAMP.

**Figura 22** – imagens ilustrativas do satélite CHAMP e do posicionamento satélite-a-satélite



**Fonte:** GFZ Potsdam, 2017

A CHAMP viabilizou uma importante evolução das pesquisas do geopotencial, por meio de inovadoras medições simultâneas de alta precisão que permitiram modelar o campo gravitacional da Terra. Paralelamente, deu origem a um modelo do campo gravitacional global, quatro vezes mais preciso do que os anteriores, a partir de poucos meses de observação. Além disso, se tornou uma missão piloto para o uso pré-operacional das observações espaciais de GPS para pesquisa atmosférica e ionosférica, bem como para aplicações em monitoramento e previsão climática (GFZ-POTSDAM, 2015).

Em 2002, é lançado o *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), decorrente de uma parceria entre a NASA e o *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR) da Alemanha. A missão GRACE, composta de dois satélites gêmeos numa órbita inicial de aproximadamente 500 km de altitude, foi desenvolvida visando o estudo das variações temporais do campo gravitacional da Terra advindas da distribuição de massas sazonais, anuais e de longo período entre a atmosfera, hidrosfera e criosfera do planeta (SCHWINTZER & REIGBER, 2002).

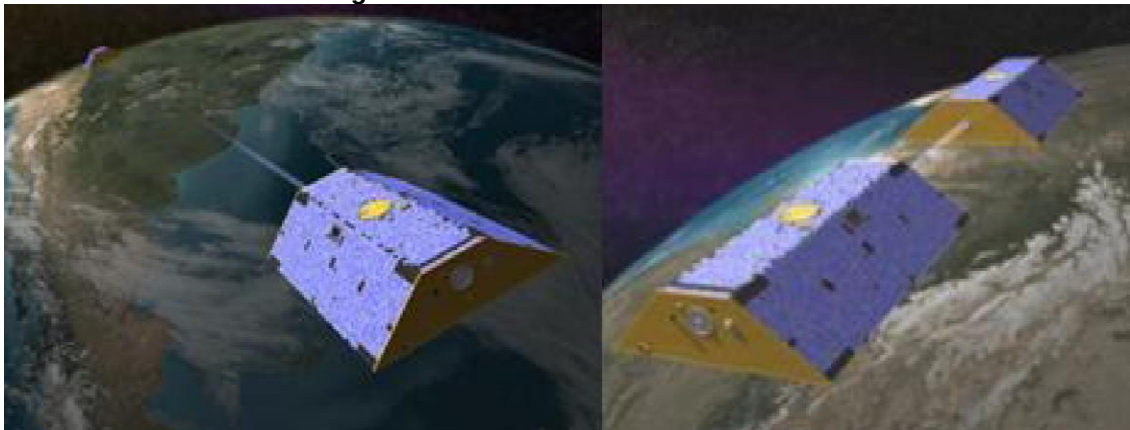
Essa combinação de dois satélites enviados simultaneamente ao espaço foi uma importante evolução em relação à missão CHAMP e todas as demais anteriores, uma vez que novos dados foram obtidos a partir das variações de velocidade e, conseqüentemente, de aceleração entre os dois satélites. Tais variações ocorrem de

maneira sutil, devido às alterações da configuração física da superfície do planeta. A distância entre os satélites, de cerca de 220 km, é monitorada com precisão de nanômetro. Uma vez sobre os oceanos, ambos os satélites mantêm uma distância praticamente constante entre si. Porém, ao entrar numa região sobre maior volume ou densidade de massa, o satélite que viaja à frente sofre um sutil aumento de sua velocidade, que pode ser mensurado pelo satélite que o segue e que sofre as mesmas oscilações de aceleração, mas com atraso. Da mesma forma, a velocidade é sutilmente reduzida ao sobrevoar regiões de menor densidade.

Após a fase inicial da missão, o primeiro modelo publicado, com base em análises preliminares de dados obtidos, já apresentou resultados de 10 a 50 vezes mais precisos do que qualquer outro modelo gravitacional anterior que atuasse em faixas médias ou longas de comprimento de onda. Até o ano de 2004, a missão GRACE foi capaz de medir o campo gravitacional da Terra com precisão até 100 vezes maior que qualquer outra medição até então existente.

Das três missões que compunham essa nova era espacial, a missão GRACE foi a que mais tempo perdurou, tendo finalizado suas atividades em 17 de outubro de 2017 (<<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/grace#mission-status>>). Imagens dos satélites GRACE são apresentadas na Figura 23.

**Figura 23 – Satélites da missão GRACE**



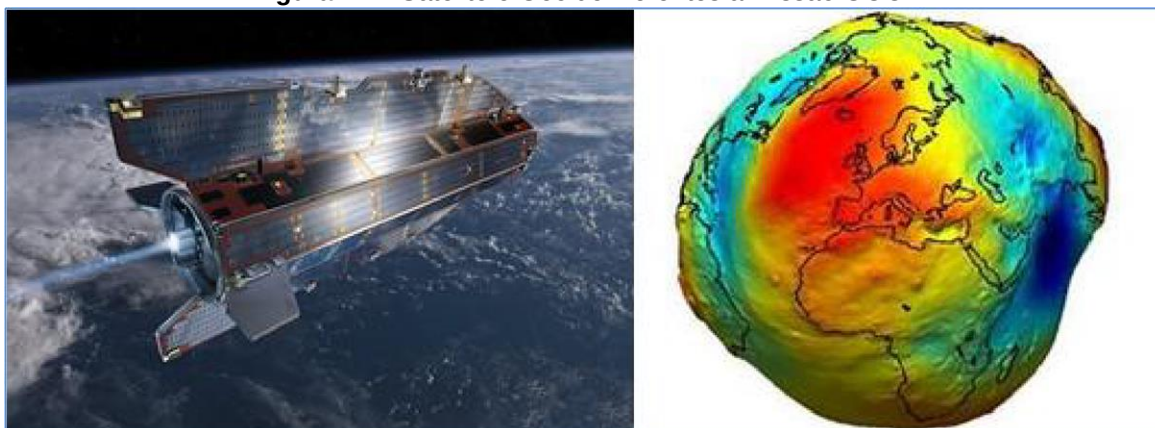
**Fonte:** NASA, 2015

A terceira e última das novas missões espaciais foi o *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer* (GOCE), idealizada pela Agência Espacial Europeia (ESA, *European Space Agency*), foi alçada ao espaço no ano de 2009. Os idealizadores do projeto pretendiam que o satélite estivesse em órbita com a menor altitude possível a fim de captar com maior intensidade os sinais do campo

gravitacional. Atingiu-se, portanto, uma altura inicial aproximada de 260 km, que foi reduzida durante o último ano da missão para algo em torno de 235 km, portanto, muito inferior à altitude das missões CHAMP e GRACE (ESA, 2015).

O instrumento principal da missão GOCE, o *Electrostatic Gravity Gradiometer*, consistia num conjunto de três pares de acelerômetros, dispostos em três eixos ortogonais, montados numa estrutura extremamente estável. Até então, esse gradiômetro chegava a ser bem mais sensível do que qualquer outro sensor do mesmo tipo que tenha sido enviado ao espaço. Assim como ocorreu com seus dois antecessores CHAMP e GRACE, o satélite contava ainda com um receptor de sinal GPS, utilizado como instrumento de rastreamento posicional, além de um retro-refletor que permitia monitorar com precisão a órbita do satélite através do SLR (ESA, 2015). Fotos ilustrativas do satélite e do modelo disponibilizado pelo GOCE que traduz a forma da Terra podem ser visualizadas a partir da Figura 24.

**Figura 24 – Satélite e Geoide inerentes à missão GOCE**



Fonte: ESA, 2015

## 2.6 Geodesia como subsídio ao Desenvolvimento Sustentável

No contexto global, em meio a inúmeras iniciativas que respaldam a adoção de um único referencial geodésico, sobressaem as da Organização da Nações Unidas (ONU). Cabe merecida ênfase à Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), popularmente chamada de “Rio 92”, por ter sido realizada na cidade do Rio de Janeiro. A Cúpula da Terra, como também é conhecida, destacou-se pela abrangência planetária, ao envolver 179 países na celebração da Agenda 21 Global<sup>8</sup>, um programa de ação bastante amplo e

<sup>8</sup> Maiores detalhes sobre a Agenda 21 Global podem ser obtidos em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>

condicionado prioritariamente ao desenvolvimento sustentável da humanidade (MMA, 2017). Conforme observa Crispim (2016), as ações propostas pela Agenda 21 relacionam a sustentabilidade ambiental com padrões de consumo e de produção sustentáveis, visando à almejada eficiência energética.

Um segundo marco global que merece ser destacado é a Declaração do Milênio, aprovada no ano de 2000 pelas Nações Unidas, após longos meses de conversações, em que foram tomadas em consideração as reuniões regionais e o Fórum do Milênio. Envolveu 191 nações e, como fruto desse fórum, uma pauta de intenções foi redigida fazendo clara menção aos temas ambientais enunciados na Agenda 21, além do estabelecimento dos Objetivos do Milênio (ODM). As metas reforçavam a necessidade de se integrar os princípios do desenvolvimento sustentável às políticas e programas nacionais, inibindo a perda de recursos ambientais. Destarte, previam a exploração sustentável dos recursos hídricos, em consonância com a preservação das florestas e com a redução de catástrofes provocadas por ações antrópicas (PNUD, 2017).

Passados 20 anos da Rio 92, realizou-se na mesma cidade a Rio +20, a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável. Desse grande evento nasceu o recente plano de ação global concebido pela ONU, traduzido pela Agenda 2030, cujas metas complementam e fortalecem as diretrizes emanadas da Agenda 21 e dos Objetivos do Milênio. A Agenda 2030 propôs 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para o período pós 2015 (Figura 25), que devem ser implementados em caráter global durante os próximos anos, até 2030. Diversas ações concernentes aos ODS devem considerar a Geodésia para prover uma única referência posicional no planeta. Menciona-se como exemplo, as propostas contidas no sétimo ODS, no tocante ao uso racional dos recursos hídricos e da hidroenergia, diante da necessidade de aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global (ONU, 2015).

**Figura 25 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis**



Fonte: MRE, 2017

As próximas seções abordam algumas iniciativas e instituições importantes que, direta ou indiretamente, fazem parte dessa interação da moderna Geodesia com a temática ambiental. Foge aos objetivos desta tese discorrer profundamente sobre cada programa ou instituição mencionada. A proposta é apresentar um panorama sintético dessa profusão de ações (globais, regionais ou nacionais), em conjunto com os principais atores envolvidos.

### 2.6.1 A Observação Sistemática da Terra - GEO e GEOSS

As primeiras iniciativas voltadas à concatenação das diversas atividades de observação da Terra, de acordo com Silva (2006), remontam ao ano de 1984, com a criação do Comitê de Observação da Terra por Satélites (CEOS, *Committee on Earth Observation Satellites*). Posteriormente, em meados da década de 1990, no contexto de uma Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, foi estabelecida a Estratégia Global de Observação Integrada (IGOS, *Integrated Global Observing Strategy*), com ênfase na integração e otimização dos sistemas de observação então existentes.

Naquela mesma década de 1990 a Europa implantou o programa Monitoramento Global do Ambiente e da Segurança (GMES, *Global Monitoring for Environment and Security*), em conjunto com a Agência Espacial Europeia visando, basicamente, o desenvolvimento comercial de produtos e dados para apoiar “inter

*alia*” programas europeus de meio ambiente, agricultura e mitigação de desastres (SILVA, 2006, p.314). Percebe-se com essas iniciativas pioneiras que as mudanças climáticas globais aliadas ao desenvolvimento sustentável da humanidade, já mobilizavam governantes e geocientistas que, por sua vez, apontavam para soluções integradas e compartilhadas (PLAG & PEARLMAM, 2009).

Anos depois, no âmbito da Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, em Washington, 2003, foi instaurada a Primeira Cúpula de Observação da Terra (EOS I, *First Earth Observation Summit*) que propôs a criação de um grupo de especialistas *ad hoc* destinados a desenvolver estratégias de investigação para observações globais integradas e a redigir um plano de concatenação dos diversos sistemas congêneres existentes. Nasceram assim as versões embrionárias do Grupo de Observação da Terra (GEO, *Group on Earth Observations*) e do Sistema Global de Sistemas de Observação da Terra (GEOSS, *Global Earth Observation System of Systems*) (GEO, 2016).

O GEO foi instituído formalmente por ocasião da Terceira Cúpula de Observação da Terra (EOS III), em Bruxelas, 2005, com anuência de representantes de 61 países. Naquele mesmo evento foi atribuída ao GEO a missão de estruturar o GEOSS, cujo plano de implantação em dez anos fora recém-aprovado. Através de parcerias voluntárias entre as esferas governamentais e privadas, o GEO congrega, nos dias atuais, representantes de mais de cem nações e também conta com 103 organizações participantes. Seus objetivos amplos ainda buscam contemplar as necessidades de informações ambientais requeridas por diversos segmentos da sociedade, disponibilizando dados e informações confiáveis sobre o Sistema Terra, em benefício da humanidade (GEO, 2016).

Esse imenso sistema ainda representa um desafio à cooperação internacional, envolvendo temas multidisciplinares concernentes à observação da Terra. A concepção do GEOSS prevê ações integradas voltadas às áreas de pesquisa, instrumentação operacional, sensores de observação sobre plataformas fixas e móveis, laboratórios, centros de desenvolvimento e aplicações, suporte computacional além de sistemas de gestão de dados e produtos de informação (SILVA, 2006).

Os objetivos difundidos na estruturação do GEOSS pressupõem que a meticulosa compreensão do Sistema Terra venha a ser fundamental para se alcançar o desejável desenvolvimento sustentável e aliviar o sofrimento humano. Para tanto,

devem ser levadas em conta variáveis diversas, correlacionadas com os processos climáticos, ecossistêmicos, hidrológicos, atmosféricos, geodinâmicos e antrópicos, a fim de proteger o meio ambiente e melhorar a saúde, bem estar e segurança da humanidade (GEOSS, 2005). De acordo com Macauley (2005), outro possível benefício que o GEOSS traria, diz respeito ao acompanhamento de acordos internacionais na esfera ambiental e de recursos naturais. Atualmente o GEOSS conta com mais de 200 milhões de dados em todas as áreas abrangidas pelo GEO, com destaque à biodiversidade e sustentabilidade dos ecossistemas (IAG, 2016).

Uma interessante exposição de Drewes (2015) mostra que a Geodesia contemporânea possui condições de beneficiar a comunidade científica e toda a sociedade, fornecendo as bases indispensáveis aos avanços e aplicações das geociências em nove Áreas de Benefício Social (SBA, *Societal Benefit Areas*), priorizadas pelo GEOSS; a Figura 26 ilustra essas perspectivas da moderna Geodesia no contexto do GEOSS.

**Figura 26 – A Geodesia no contexto das SBA**



**Fonte:** Adaptado de Drewes, 2015

Decorridos mais de dez anos após o lançamento de suas linhas mestras, o GEOSS ainda está se estruturando, a partir das diretrizes emanadas da comunidade GEO. No âmbito de tais diretrizes o GEOSS deverá exercer enfoque prioritário nas nove SBAs contempladas pela Geodesia contemporânea que, direta ou indiretamente,

poderiam impactar o crescimento sustentável da humanidade. O Quadro 1 sintetiza as linhas mestras de cada uma dessas nove Áreas de Benefício Social.

**Quadro 1 – Áreas de Benefício Social do GEOSS contempladas pela moderna Geodesia**

| <b>SBA</b>            | <b>Objetivos do CEO</b>                                                                 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Agricultura</b>    | Dar suporte à agricultura sustentável e combater a desertificação                       |
| <b>Água</b>           | Melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos através do entendimento do ciclo da água |
| <b>Biodiversidade</b> | Entender, monitorar e conservar a biodiversidade                                        |
| <b>Clima</b>          | Entender, acessar, prever, mitigar e adaptar-se às variações e mudanças climáticas      |
| <b>Desastres</b>      | Reduzir a perda de vidas e de propriedades, devido a desastres naturais e antrópicos    |
| <b>Ecossistemas</b>   | Melhorar o gerenciamento e a proteção de ecossistemas terrestres, costeiros e marinhos  |
| <b>Energia</b>        | Melhorar o gerenciamento dos recursos energéticos                                       |
| <b>Meteorologia</b>   | Melhorar a informações, a previsão e alertas relacionados à meteorologia                |
| <b>Saúde</b>          | Entender fatores ambientais que afetam a saúde e o bem-estar humano                     |

**Fonte:** Adaptado de Plag & Pearlman, 2009

## 2.6.2 A Informação Geoespacial no âmbito da Geodesia

Na moderna conjuntura global, amplamente interconectada, a Informação Geoespacial (IG) vem sendo cada vez mais utilizada por diversos segmentos da sociedade. O termo georreferenciamento, bastante disseminado, enfatiza a importância de se associar uma localização a qualquer ocorrência ou informação divulgada. Em outras palavras, não basta a menção à **designação**, **motivação** ou **caracterização** de um determinado evento, sem explicitar a **localização** de tal ocorrência. Por conta dessa demanda contemporânea de se georreferenciar as incontáveis IGs com a maior exatidão possível, cabe à Geodesia propiciar uma infraestrutura geodésica compatível com essas crescentes necessidades.

De acordo com BRASIL (2008) a IG é caracterizada essencialmente pela componente espacial, que indica a localização de um fenômeno com base em um Sistema Geodésico de Referência, em dado instante ou lapso temporal. Em função dos avanços tecnológicos, sobretudo no tocante à internet e aos dispositivos móveis de telefonia e localização, as IGs vêm sendo acessadas por parte significativa da população mundial e, cada vez mais, servem de base às decisões nas esferas públicas e privadas (STENNER, 2015). Diante de tais circunstâncias, é crescente o interesse por IG em diversas atividades no planeta. Nesse contexto, Fortes (2012)

aponta para algumas áreas estratégicas e prioritárias na esfera global, onde há grande demanda por IG consistentes e atualizadas:

- defesa e inteligência;
- pesquisa e educação;
- energia e comunicações;
- serviços de posicionamento e navegação;
- governo eletrônico;
- gerenciamento de recursos naturais;
- monitoramento de riscos e respostas a desastres; e
- desenvolvimento sustentável.

Segundo considerações do mesmo autor, os maiores desafios concernentes às IG no Brasil estão correlacionados com o planejamento governamental nas ações de uso da terra, expansão agrícola, previsão do tempo, serviços de alerta a eventos climáticos extremos, monitoramento e proteção ambiental. Ferreira & Carneiro (2008) acrescentam que a IG possa vir a funcionar como instrumento de transformação social, permitindo a participação popular nas ações associadas à gestão territorial e possibilitando que pessoas leigas ampliem suas capacidades de intervenção social.

Para fazer frente às demandas e necessidades referentes ao uso, organização e disponibilização de IG, surge a iniciativa global da Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE), (SDI, em inglês, *Spatial Data Infrastructure*). De acordo com Rajabifard et al. (2006) uma IDE é traduzida genericamente por uma plataforma multidisciplinar, cujo objetivo é facilitar e coordenar o compartilhamento de dados geoespaciais, envolvendo parcerias em diversas esferas e permitindo aos usuários economizarem tempo, recursos e esforços. Araújo (2016), acrescenta que a IDE possibilita aos gestores públicos a localização, exploração e o acesso aos dados e IG, subsidiando a tomada de decisões.

Das diversas características indispensáveis em uma IDE, salienta-se a interoperabilidade, que traduz a capacidade de compartilhamento e de troca de informações, evitando incompatibilidades entre IG originadas de fontes diferentes (LUNARDI & ISSMAEL, 2015). Não existe um recorte territorial definido para o estabelecimento de uma IDE, que pode ter abrangência global, continental, nacional, estadual, municipal, regional ou corporativa, dependendo dos objetivos norteadores da sua criação (RAJABIFARD et al., 2006).

A IDE brasileira, denominada Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), foi instituída pelo Decreto nº 6.666/2008, mas formalmente estabelecida em 2010, na esfera do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG), subordinada à Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR). A INDE, a exemplo de uma IDE, é caracterizada por um conjunto integrado de tecnologias; políticas; mecanismos e procedimentos de coordenação e monitoramento; padrões e acordos, necessário para facilitar e ordenar a geração, o armazenamento, o acesso, o compartilhamento, a disseminação e o uso dos dados geoespaciais de origem federal, estadual, municipal e distrital (CONCAR, 2010).

As considerações de Araújo (2016, p.40) revelam que, antes da criação da INDE, os dados e IG eram produzidos e compartilhados em diferentes formatos e padrões. Além disso, eram mantidos em sistemas que não conversavam entre si, servindo apenas aos propósitos para os quais foram adquiridos. Diante desse quadro, os objetivos que pautaram a criação da INDE, à semelhança de outros países, buscaram amenizar essas inconveniências e, conforme o já mencionado Decreto instituidor, podem ser resumidos por três linhas mestras:

- disciplinar a geração, armazenamento, acesso, compartilhamento, disseminação e uso dos dados geoespaciais;
- utilizar os padrões e normas homologados pela CONCAR na produção dos dados geoespaciais pelos órgãos públicos brasileiros; e
- evitar a duplicidade de ações e o desperdício de recursos na obtenção de dados geoespaciais.

Desde o seu estabelecimento a INDE vem cumprindo suas atribuições nas mais variadas esferas. Conforme explicam Augusto & Araújo (2015), a INDE vem subsidiando a elaboração de políticas públicas e apoiando ações integradas de governo, com ênfase ao acompanhamento das obras do Programa de Aceleração de Crescimento (PAC) e atividades concernentes ao monitoramento do desmatamento da Amazônia. O acesso aos dados, informações e mapas associados às IGs, pode ser efetuado através do portal da INDE ([www.inde.gov.br](http://www.inde.gov.br)). Uma minuciosa análise sobre a usabilidade desse portal é oferecida por Araújo (2016).

A concepção da INDE seguiu a tendência de uma IDE continental preconizada por iniciativas regionais concernentes às Américas, onde os principais atores foram as instâncias diretivas e os membros do Instituto Panamericano de Geografia e História (IPGH), da Rede Geoespacial da América Latina e do Caribe (GeoSUR) e,

ainda, do Comitê Permanente para a Infraestrutura de Dados Geoespaciais das Américas (CP-IDEA). As contribuições de cada uma dessas instituições tiveram papel preponderante para colocar a IG a serviço do desenvolvimento em diversos níveis no continente americano (IPGH, 2013).

O IPGH é a mais antiga instituição interamericana especializada em Cartografia, Geografia, Geofísica e História, tendo sido fundado em 1928. Vinculado à Organização dos Estados Americanos (OEA), é um organismo intergovernamental que vem estimulando a cooperação entre as instituições especializadas das Américas e as Organizações Internacionais nos temas citados. No ano de 2007 foi incumbido formalmente pela OEA para consolidar as bases de dados territoriais dos países membros a fim de subsidiar o desenvolvimento social e econômico através de uma IDE continental (IPGH, 2013). Cabe assinalar a relevância do IPGH como articulador das iniciativas e atribuições dessas entidades, promovendo intercâmbios e evitando indesejáveis duplicidades de esforços (VARGAS et al., 2016).

Patrocinado pela Corporação Andina de Fomento (CAF), uma versão embrionária do GeoSUR foi inicialmente concebida, no ano de 2000, com a denominação Programa Cóndor. Naquela ocasião a CAF se ressentia da falta de IG integradas para nortear investimentos em projetos estruturais no continente americano e no Caribe. Em 2007 veio à tona o Programa GeoSUR, como uma evolução natural do Programa Cóndor, oferecendo à comunidade diversos geoserviços, em uma plataforma web, que permitiu acesso gratuito a mapas oficiais, fotografias aéreas e IG dos países latino-americanos e caribenhos. Atualmente estão disponíveis no Portal GeoSUR mais de 300 mapas com respectivos metadados, elaborados por 35 instituições participantes (VARGAS et al., 2016).

O estabelecimento do CP-IDEA ocorreu em função de recomendações provenientes da Sexta Conferência Cartográfica Regional das Nações Unidas para as Américas, em 1997, que apontavam, dentre outras medidas, para a necessidade de um comitê permanente de IDE em âmbito continental. Por conseguinte, em fevereiro de 2000, as 21 nações signatárias celebraram um acordo preliminar criando um Comitê Permanente com o intuito de abarcar todos os países do continente no desenvolvimento de uma Infraestrutura Regional de Dados Espaciais (VARGAS et al., 2016). A meta central que orientou as atividades do CP-IDEA nos anos subsequentes era maximizar os benefícios econômicos, sociais e ambientais derivados do uso da IG, embasada no conhecimento e intercâmbio das experiências e tecnologias de

diferentes países, com vistas a estabelecer uma Infraestrutura de Dados Geoespaciais das Américas (IPGH, 2013).

Desde o ano de 2013 o CP-IDEA recebeu a nova denominação de Comitê Regional das Nações Unidas sobre a Gestão Global de Informação Geoespacial para as Américas (UN-GGIM:Américas, *Regional Committee of the UN Global Geospatial Information Management for the Americas*), mantendo as mesmas diretrizes, mas se inserindo formalmente como coadjuvante regional na conjuntura global propiciada pelas Nações Unidas(ONU) através do Comitê de Especialistas da ONU em Gestão Global da Informação Geoespacial (UN-GGIM – *United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management*).

A instauração do UN-GGIM foi proposta pelo Conselho Econômico e Social das Nações Unidas (ECOSOC - *United Nations Economic and Social Council*), através da resolução 2011/24, preenchendo uma grande lacuna no gerenciamento global da IG, que estava sendo gradativamente ocupada por organizações internacionais de iniciativa privada (UN-GGIM, 2017). Entretanto, essa necessidade de uma coordenação global já tinha sido evidenciada por ocasião da nona Conferência Cartográfica Regional para as Américas das Nações Unidas, em 2009, através de uma consulta a inúmeros especialistas em IG (AUGUSTO & ARAÚJO, 2015).

Assim, o UN-GGIM surgiu da necessidade de um mecanismo intergovernamental global que amenizasse o desconhecimento sobre temas contundentes por parte dos tomadores de decisão, interligando as pesquisas e resultados advindos das diversas organizações afins, com as decisões, ações e políticas dos Estados membros (UN-GGIM, 2017). Desde a sua instauração o UN-GGIM atua como entidade máxima da comunidade global de IG, indo ao encontro de problemas globais transfronteiriços, como mudanças climáticas e desastres naturais (ARAÚJO & AZEVEDO, 2014). No entendimento de Fortes (2012), há vantagens de o GGIM estar sob os auspícios da ONU, principalmente pelas possíveis articulações entre Estados membros e entidades internacionais de financiamento, para promover a produção e o compartilhamento da IG em caráter global, priorizando as nações em desenvolvimento.

O Comitê de Especialistas que compõem o GGIM segue as orientações oriundas dos Estados membros. Nesse sentido, considera as melhores práticas e experiências em IG para apontar sugestões direcionadas ao desenvolvimento de metodologias, estratégias e padrões no gerenciamento da IG, de forma coordenada,

nas esferas nacionais, regionais e internacionais. Com base nesses pressupostos, algumas áreas prioritárias de trabalho são indicadas pelo UN-GGIM (2017), com especial destaque às iniciativas voltadas ao desenvolvimento sustentável concernente às informações geoespaciais, tendo como referência posicional uma consistente infraestrutura geodésica global.

### **2.6.3 O Sistema de Observação Geodésica Global - GGOS**

O limiar do século XXI trouxe uma importante contribuição ao cenário geodésico mundial, através do Sistema de Observação Geodésica Global (GGOS, *Global Geodetic Observing System*). Concebido pela IAG, esse Sistema começou a ser planejado no ano de 2001, mas se estabeleceu formalmente em 2003. O GGOS funciona como o principal elo da IAG à comunidade científica e à sociedade em geral, visando primordialmente aumentar a compreensão da dinâmica existente no Sistema Terra (IAG, 2016a).

Os objetivos precípuos do GGOS estão correlacionados com a implantação de uma infraestrutura geodésica para monitorar o Sistema Terra, permitindo ampliar o entendimento do comportamento dinâmico e da quantificação das mudanças do planeta no tempo e no espaço. Para fazer frente a tais objetivos, destacam-se as metas prioritárias que nortearam a criação do GGOS (id., ibid.):

- disponibilizar uma infraestrutura geodésica de referência global, que serviria para mensurar e interpretar os processos envolvidos nessas mudanças do planeta e em outras aplicações científicas;
- fornecer as observações necessárias para monitorar, mapear e entender as mudanças na forma, rotação e distribuição de massa da Terra; e
- beneficiar a ciência e a sociedade ao prover os fundamentos essenciais aos avanços científicos inerentes ao conhecimento do sistema planetário.

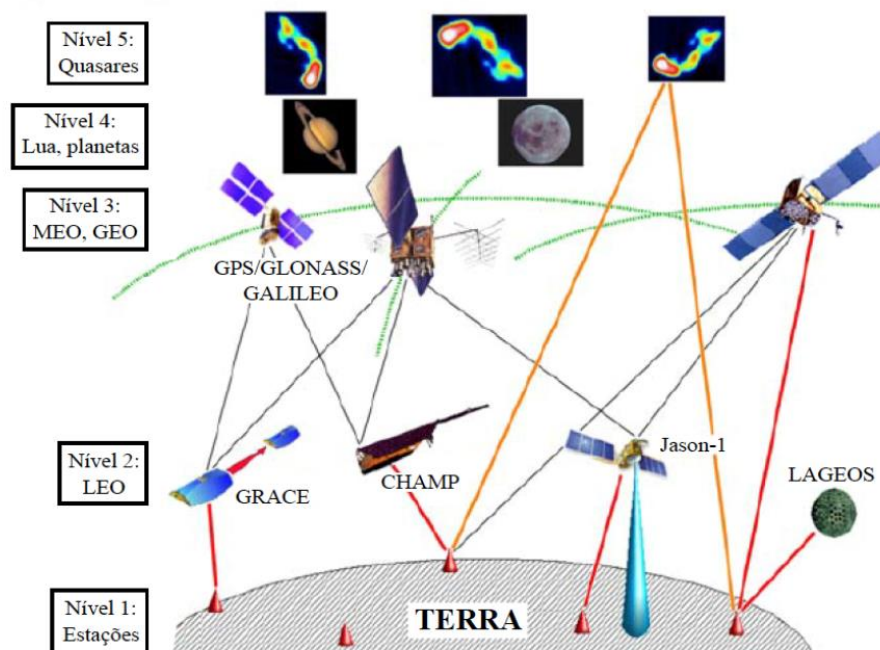
Inserido no contexto dos macros objetivos e das missões prioritárias já citadas, Freitas et al., (2015) acrescentam três temas centrais que são objeto de enfoque do GGOS:

- sistema global de altitudes;
- monitoramento de catástrofes naturais; e
- mudanças do nível do mar, variabilidade espacial e previsão climática.

O significado do acrônimo GGOS contempla duas estruturas distintas: uma diz respeito ao aspecto organizacional, abarcando Comitês e Grupos de Trabalho, enquanto a segunda conotação corresponde à infraestrutura voltada às observações advindas das diferentes técnicas e equipamentos, espaciais e terrestres, envolvidos na coleta e análise de dados (IAG, 2016a).

A estrutura observacional disponibilizada pelo GGOS tem o respaldo dos serviços e das comissões da IAG. Essa estrutura observacional pressupõe cinco grandes níveis de observação, compostos por sensores ativos e passivos, localizados em estações geodésicas terrestres, satélites artificiais e corpos celestes. O primeiro nível é composto pela infraestrutura geodésica terrestre; o segundo compreende os satélites que circulam em baixas órbitas (LEO, *low Earth orbit*); o terceiro nível diz respeito à constelação GNSS e aos satélites rastreados por laser (SLR, *Satellite Laser Ranging*); o quarto nível observacional é constituído pelas missões planetárias e infraestruturas geodésicas em planetas e o quinto e último nível corresponde aos objetos extragalácticos. Esse complexo sistema é apresentado esquematicamente pela Figura 27.

**Figura 27** – Estrutura observacional do GGOS, compreendendo cinco níveis de observação

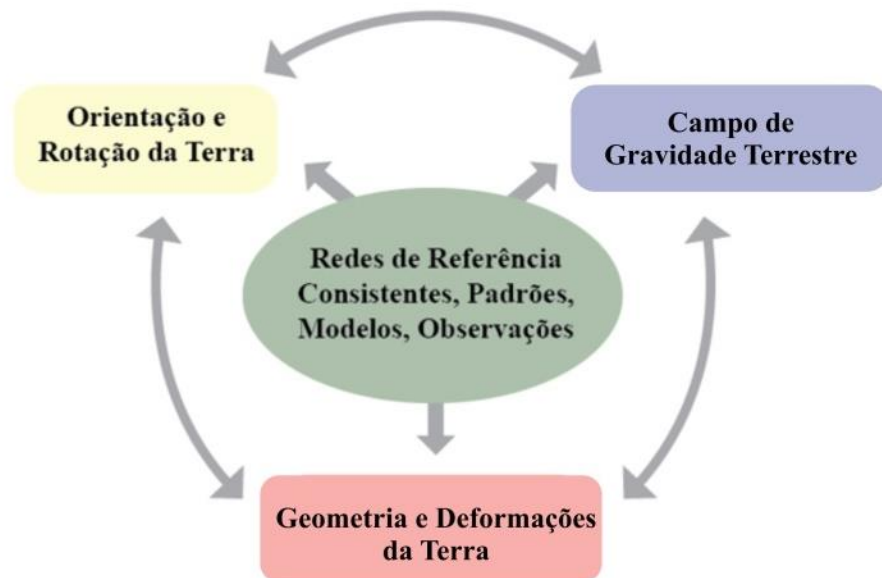


Fonte: Adaptado de Plag & Pearlman (2009)

O GGOS consolida a tendência recente que considera os três objetivos fundamentais da Geodesia contemporânea: a geometria e deformações da Terra; a

orientação da Terra no espaço; e o campo de gravidade terrestre (BLITZKOW, 2007). A Figura 28 sintetiza as interdependências existentes no grande sistema preconizado por GGOS, denotando a integração entre os três objetos fundamentais com o arcabouço conceitual e as infraestruturas de referência. Essas bases conceituais e observacionais dão o suporte indispensável às técnicas espaciais e terrestres empregadas no monitoramento dos processos dinâmicos inerentes ao Sistema Terra. Tais interdependências são evidenciadas por Plag & Pearlman (2009, p.5), ao afirmarem que “em última análise, todas as observações geodésicas são afetadas pelos mesmos processos físicos do Sistema Terra”.

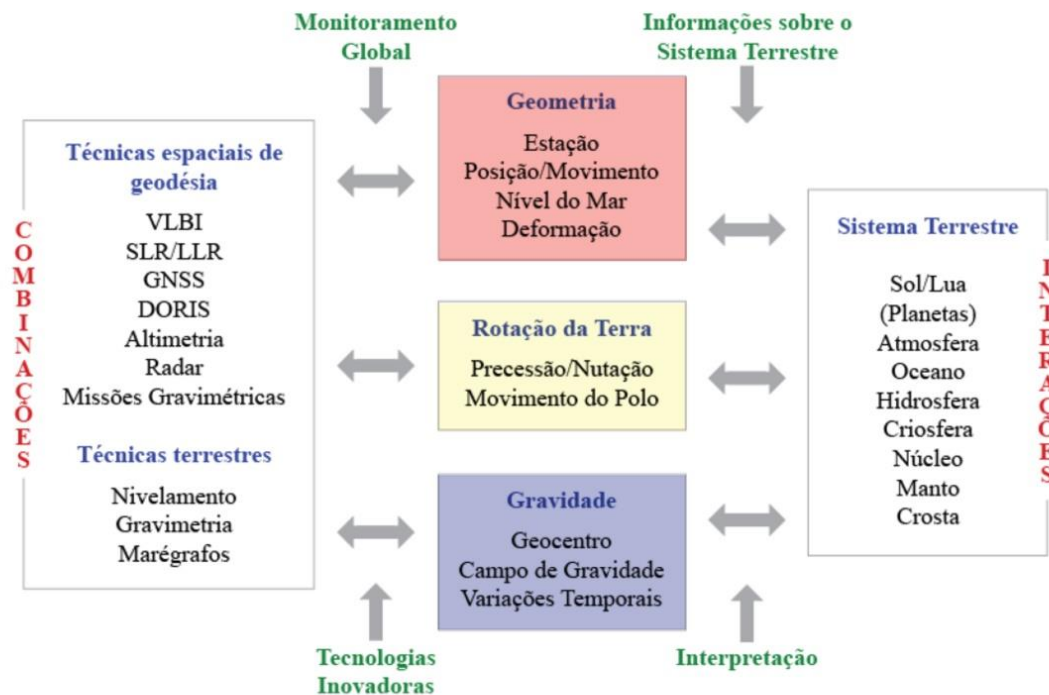
**Figura 28** – Interligação entre os três pilares da geodesia moderna e os componentes principais da infraestrutura de referência GGOS



**Fonte:** Adaptada de Drewes, 2015

A Figura 29 traz uma síntese dos principais elementos que compõem a complexa arquitetura do GGOS. Assim, ficam evidenciadas as combinações das observações geodésicas espaciais e terrestres envolvidas no monitoramento global e suas correlações com os diversos processos interativos do Sistema Terra, através dos três pilares mestres da geodesia contemporânea.

**Figura 29** – Principais elementos e correlações presentes na estrutura do GGOS, a partir dos três pilares da geodesia moderna



**Fonte:** Adaptado de Plag & Pearlman, 2009

O estudo, a compreensão e a modelagem dos parâmetros considerados pela moderna geodesia, requerem infraestruturas de referência precisas, consistentes e estáveis. Drewes (2015), faz uma curiosa apologia ao famoso aforismo "Dê-me um ponto fixo e eu posso mover o mundo", atribuída ao cientista grego Arquimedes (287 – 212 a.C), ao resumir como devem ser as principais características dessas infraestruturas geodésicas de referência requeridas pelo GGOS:

- mais precisas do que a magnitude dos fenômenos a serem analisados;
- globalmente consistentes e confiáveis (a mesma precisão em qualquer lugar da Terra); e
- estáveis durante longos períodos (a mesma precisão em qualquer momento).

#### 2.6.4 O Referencial Geodésico do Futuro - GGRS e GGRF

As diversas iniciativas que se correlacionam com o dinamismo presente no Sistema Terra apontavam para a necessidade de uma única infraestrutura de abrangência global, suficientemente precisa e dinâmica, que sirva como referência à observação, compreensão e representação de fenômenos, ocorrências e informações

do mundo real. De forma semelhante, instituições, sistemas e comissões envolvidas com a produção de IG, capitaneados pelo UN-GGIM, demandavam referenciais consistentes e estáveis que facilitassem a interoperabilidade e acompanhassem as constantes evoluções tecnológicas.

Vindo ao encontro de tais necessidades, em 26 de fevereiro de 2015, a Assembleia Geral da ONU, ocorrida em Nova Iorque, tornou pública sua primeira resolução, que estabeleceu o Sistema Geodésico de Referência Global (GGRS, *Global Geodetic Reference System*), materializado pela Infraestrutura Geodésica Global de Referência para o Desenvolvimento Sustentável (GGRF, *Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development*) (IAG, 2016b).

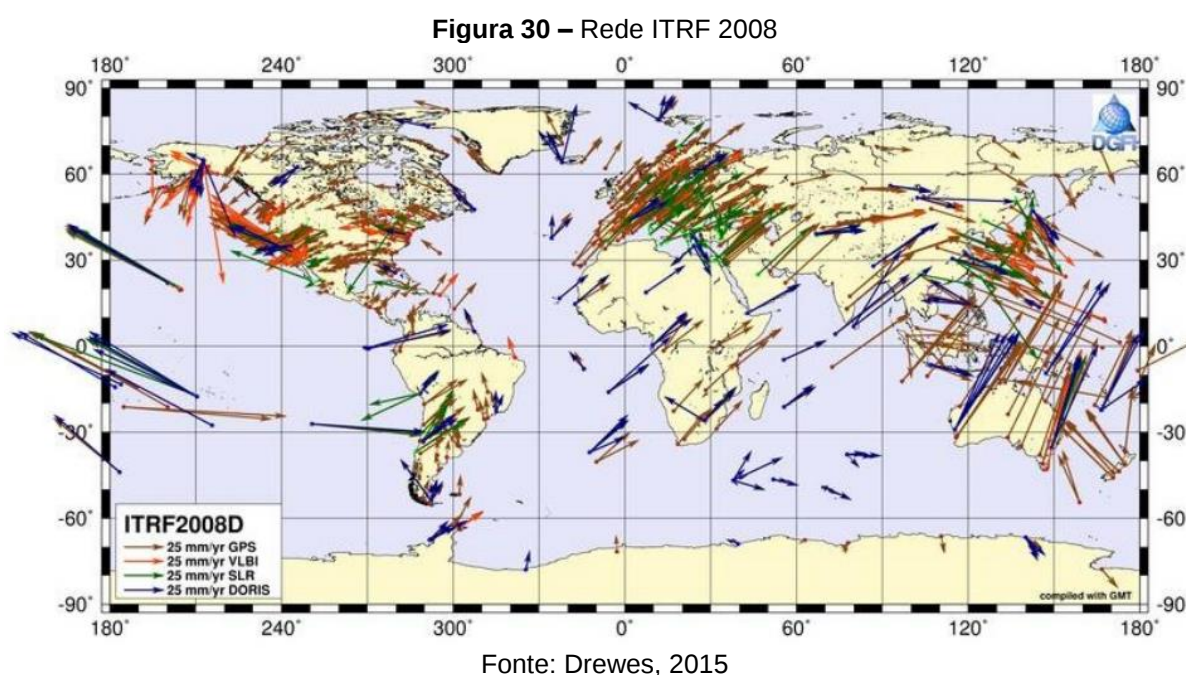
Cabe aos GGRS/GGRF compatibilizarem essa infraestrutura global de referência posicional entre os diversos segmentos de usuários disseminados pelo planeta. Assim sendo, no contexto da observação integrada do Sistema Terra, os GGRS/GGRF se fazem presentes através do GGOS que, por sua vez, representa a IAG no GEO, e contribui ativamente para a estruturação do GEOSS. Em paralelo, entidades produtoras e usuárias de informações geográficas também são contempladas pelos GGRS/GGRF, sob a coordenação da IAG, em consonância com as orientações do UN-GGIM e utilizando a estrutura observacional do GGOS, possibilitando maiores precisões nos georreferenciamentos das IGs em todo o planeta.

Enquanto sistema, o GGRS é traduzido por modelos matemáticos e físicos, teorias e metodologias geodésicas, que fornecem as bases conceituais correspondentes. A partir desses pressupostos teóricos, a posição de um ponto será representada por suas coordenadas geométricas tridimensionais ( $X, Y, Z$ ), o potencial de gravidade da Terra real ( $W$ ), uma altitude física ( $H$ ) e o vetor ( $g$ ) correspondente à aceleração de gravidade (IAG, 2016b).

Vindo ao encontro dessa abordagem contemporânea, as considerações de Ihde et al. (2017) fazem menção à definição de um moderno Sistema Geodésico de Referência (SGR), a exemplo do GGRS, como sendo um conjunto de constantes, convenções, modelos e parâmetros necessários à representação matemática de grandezas geométricas e físicas associadas ao posicionamento espacial de feições e eventos.

Quando estiver plenamente estabelecido, o GGRF será composto por três importantes referenciais da Geodesia contemporânea, que necessariamente levarão

em consideração a componente temporal. O primeiro referencial, já implantado, diz respeito ao arcabouço geométrico tridimensional, ou planialtimétrico, provido globalmente pelo ITRF. Este referencial oferece as coordenadas geocêntricas ( $X, Y, Z$ ) de estações que materializam uma rede global, em conjunto com as respectivas precisões. A RBMC materializa esse arcabouço planialtimétrico em território brasileiro. O cartograma constante na Figura 30 apresenta a rede de estações do ITRF2008, na qual se embasa o GGRF, separadas pelas diferentes técnicas utilizadas nas correspondentes materializações, com os respectivos vetores de velocidade.

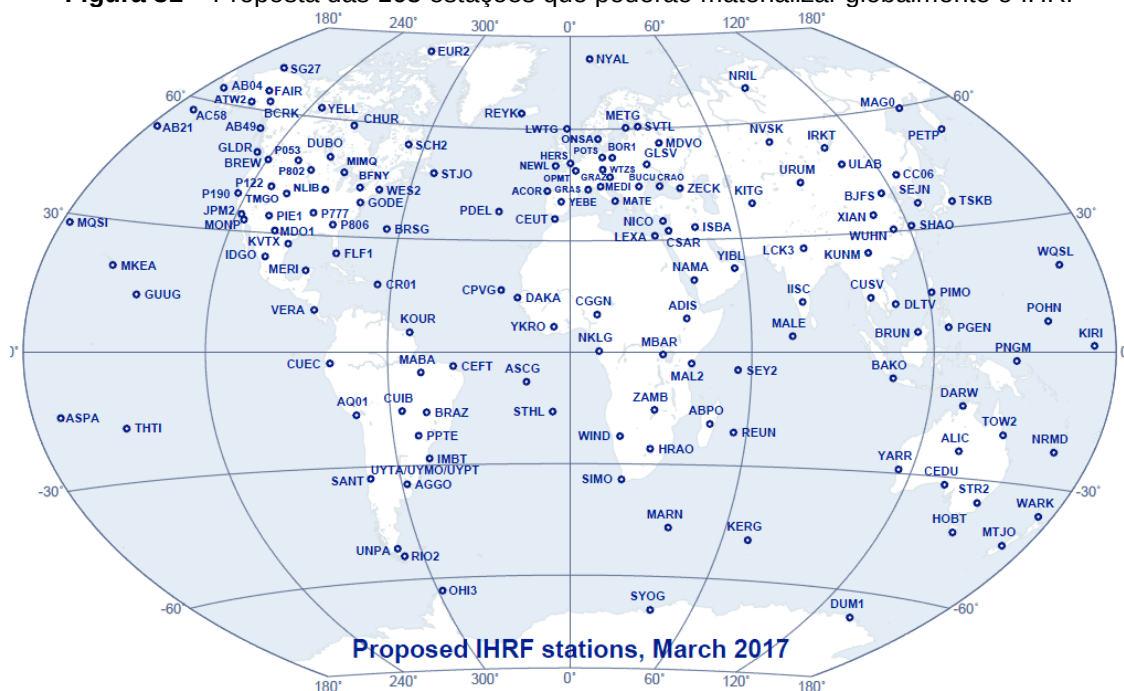


O segundo referencial que integrará o GGRF, ainda em fase de implantação, foi objeto da Resolução nº 1 da IAG, de julho de 2015, que estabeleceu o Sistema Altimétrico de Referência Internacional (IHRS, *International Height Reference System*), realizado pela Infraestrutura Altimétrica de Referência Internacional (IHRF, *International Height Reference Frame*) (IAG, 2015a). Por meio deste referencial as altitudes do GGRF serão expressas no espaço do geopotencial, adicionalmente a alguma altitude física (FREITAS, 2016).

De acordo com as previsões de Sanchez et al. (2016), o IHRF será materializado por uma rede de observatórios geodésicos coincidentes com estações GGOS, acrescidos de estações de referências pertencentes, preferencialmente, às redes nacionais de estações ativas. Essas estações nacionais deverão estar conectadas aos respectivos Sistemas Verticais de Referência Nacionais (SVRN) e

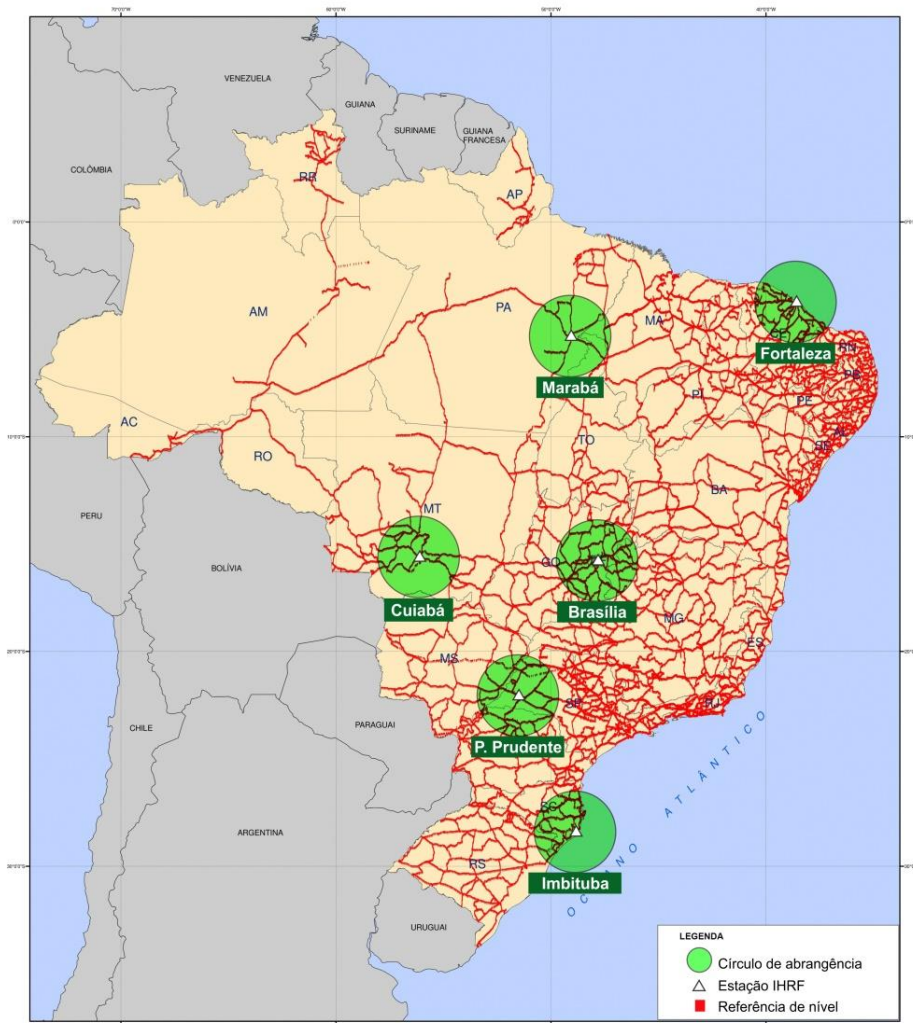
serão aquinhoadas com densificações gravimétricas num raio de aproximadamente 210 km ao redor de cada estação. A Figura 31 apresenta proposta das 163 estações IHRF distribuídas no planeta.

**Figura 31** – Proposta das 163 estações que poderão materializar globalmente o IHRF



Fonte: Sanches, 2017

No Brasil as tarefas inerentes à materialização do IHRF tiveram início no ano de 2017. A provável estrutura da rede prevê o estabelecimento de seis estações de referência, localizadas, inicialmente, nas cidades de Brasília, Cuiabá, Imbituba, Fortaleza, Presidente Prudente e Marabá. Cabe precipuamente ao IBGE realizar a implantação e gestão do IHRF em terras brasileiras, visando à gradativa integração ao SGB. Por conta disso, a Coordenação de Geodesia (CGED), da Diretoria de Geociências do IBGE (DGC), tem como prioridade a realização de atividades voltadas à materialização da infraestrutura preconizada pelo IHRF. A localização dessas seis estações em conjunto com o arcabouço altimétrico nacional são disponibilizados pela Figura 32.

**Figura 32 – Previsão inicial das estações do IHRF no Brasil**

**Fonte:** Adaptado de Luz, 2016

A terceira grande referência do GGRF, ainda em fase de estudos, representa a vertente gravimétrica, indispensável às determinações de altitudes. O novo Sistema de Referência Global de Gravidade Absoluta (GAGS, *Global Absolute Gravity Reference System*) foi criado pela Resolução nº 2 da IAG para substituir, gradativamente, duas grandes infraestruturas que já não atendem às exigências de uma referência de gravidade moderna: a IGSN71, praticamente em desuso, e a *International Absolute Gravity Basestation Network* (IAGBN), estabelecida em 1986 (IAG, 2015b; FREITAS, 2016). As repercussões do GAGS no contexto nacional pressupõem o desejável adensamento da Rede Nacional de estações Gravimétricas Absolutas (RENEGA).

As considerações da IAG (2015b), inseridas na mencionada Resolução nº 2, explicam que essa nova referência será embasada precipuamente em comparações

periódicas de gravímetros absolutos. Revelam ainda que, somente com um sistema de referência gravimétrico mais preciso e em escala global, as variações temporais de gravidade podem ser determinadas com alta confiabilidade. Essas análises do campo de gravidade através do tempo possibilitam uma melhor compreensão do Sistema Terra, servindo inclusive para monitorar as deformações crustais e de transportes de massa (WILMES et al., 2010).

A designação ‘desenvolvimento sustentável’ atrelada ao acrônimo GGRF, por si só, denota a preocupação em se ter uma estreita vinculação da Geodesia com o meio ambiente e com os recursos naturais. As informações coletadas em qualquer lugar do planeta, devidamente referenciadas pelo GGRF, poderão ser aplicadas em programas científicos, sociais, políticos e econômicos, subsidiando a formulação de políticas de desenvolvimento sustentável. Há diversos focos de análise, enfatizando-se o monitoramento das mudanças climáticas e o nível dos oceanos, visando à mitigação de desastres naturais, além de uma grande variedade de aplicações em transportes, agricultura e engenharia (GGRF, 2016).

## **2.7 Algumas Interações da Geodesia Contemporânea**

A Geodesia atual pode ser considerada uma “ciência serviço”, apoiando a inúmeras atividades cotidianas. De acordo com o que já foi apresentado na tese, compete à ciência geodésica fornecer a infraestrutura de referência para posicionamentos precisos. Nesse contexto cabem os comentários de Santos (2006) ao explicar que um referencial geodésico é fundamental para a localização precisa de qualquer objeto na Terra. Indo mais adiante, o mesmo autor deixa claro que referenciais desiguais significam localizações diferentes para um mesmo objeto.

Fazendo uma analogia com a construção de um edifício, à geodesia caberia uma função estrutural, representada pelas bases, alicerces e colunas dessa aludida edificação. Como se sabe, esses elementos estruturais quase não são notados pela população, salvo se houver desmoronamentos, rachaduras ou problemas correlacionados ao projeto. Guardadas as devidas proporções, isso também ocorre quando a infraestrutura geodésica não é devidamente considerada.

Pode parecer um exagero, mas não é rara a ocorrência de falhas e impropriedades decorrentes do uso inadequado dos fundamentos geodésicos. Trazendo-se à tona situações do mundo real, segundo Santos (2007), a Rodovia Castelo Branco foi interditada pela perfuração indevida de um duto da Petrobrás, no

ano de 2001, devido à inobservância aos referenciais geodésicos. Fortes & Augusto (2015), comentam que uma casa foi demolida acidentalmente nos EUA, devido a erros nas coordenadas da mesma. Outros exemplos triviais de impropriedades congêneres estão correlacionados à adoção de referenciais altimétricos arbitrários, ao invés de altitudes vinculadas à RVRN.

As contribuições geodésicas, em termos de equipamentos e infraestrutura, atendem não somente ao viés científico, no tocante à compreensão de fenômenos inerentes ao Sistema Terra, mas também facilitam o cotidiano de uma sociedade moderna, indo ao encontro das expectativas e necessidades da comunidade usuária. De acordo com Plag & Pearlman (2009), basicamente a Geodesia contribui de duas maneiras distintas com os processos existentes no planeta: fornecendo a infraestrutura de referência de onde são derivadas as coordenadas e através das observações geodésicas propriamente ditas.

No âmbito de uma sociedade global próspera e sustentável há demandas crescentes de aplicações que necessitam de um único e preciso referencial geodésico. Em linhas gerais, tais aplicações estão correlacionadas às diversas modalidades de posicionamento, navegação e mapeamento. Com o passar do tempo novos empregos da Geodesia vêm sendo identificados, denotando a pluralidade de possíveis aplicações e a sinergia existente com diversas áreas do conhecimento humano.

Além daquelas aplicações ligadas diretamente à ciência geodésica, algumas das quais já mencionadas nesta tese, outros empregos da Geodesia podem ser evidenciados nas áreas de: Agricultura; Agrimensura; Agronomia; Arqueologia; cadastro imobiliário; Cartografia; Ciências Ambientais; Climatologia; demarcações; desastres naturais; Ecologia; Engenharia; geodinâmica; Geofísica; Geologia; Geomorfologia; Glaciologia; Hidrologia; inserção social; magnetometria; Meteorologia; mineração; montanhismo; navegação (aérea, aquática, espacial, e terrestre); Oceanografia; pesca comercial; questões agrárias; saúde pública; serviços de utilidade pública (distribuição de água, eletricidade, esgoto, telefonia); Sismologia; recreação; regularização fundiária; reordenamento territorial; telecomunicações; transportes; e turismo.

Foge ao escopo da tese o detalhamento dessa imensa gama de atividades que, direta ou indiretamente, são abarcadas pela Geodesia. Com vistas à exemplificação, traduzindo a relevância desta ciência no planeta, serão pormenorizadas algumas

interações da ciência geodésica, incluindo temas de cunho socioambiental, em consonância com os objetivos contidos na temática abordada pela tese.

O apoio à Cartografia talvez seja a aplicação mais tradicional da Geodesia. A necessidade de um único sistema de referência à cartografia brasileira é justificada pela concatenação da extensa documentação cartográfica existente no país, envolvendo o Sistema Cartográfico Nacional (SCN), em suas diversas escalas, além das inúmeras modalidades de cartas e mapas temáticos. As bases cartográficas são fundamentais ao planejamento, subsidiando a tomada de decisões nas esferas públicas. Adicionalmente a Cartografia também tem apoiado a inúmeras pesquisas científicas, mormente aquelas de cunho ambiental e socioeconômico. Atualmente, com a disseminação massiva da internet, os mapas interativos estão presentes em diversos aplicativos e atividades quotidianas (NOAA, 2017).

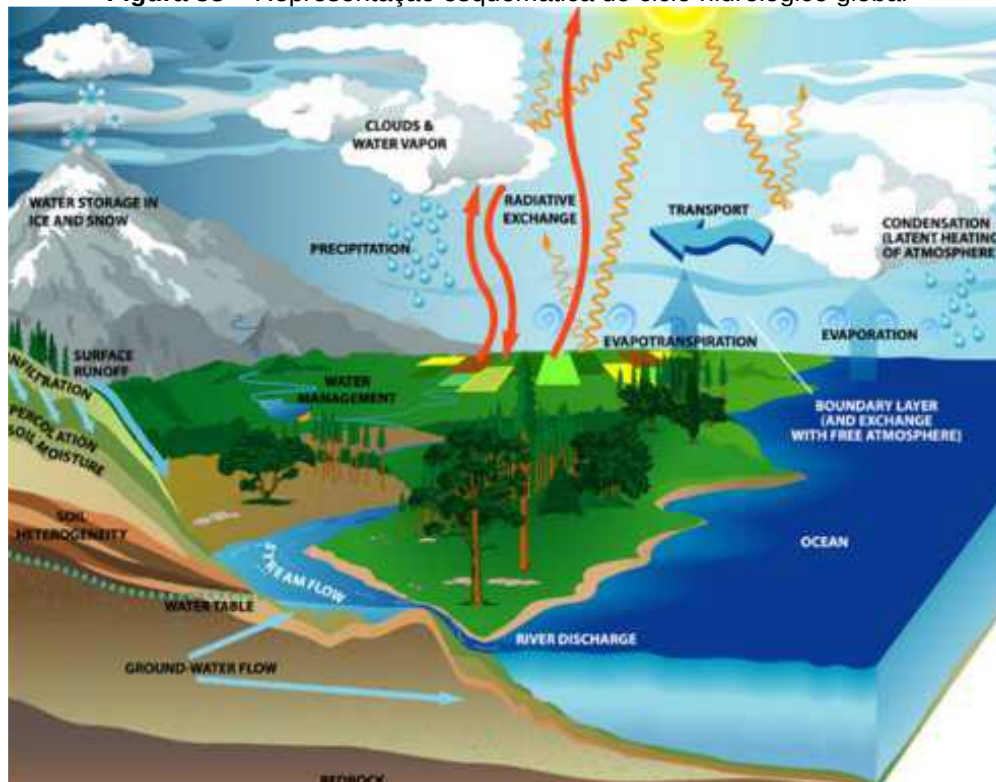
Recentemente a ciência geodésica ganhou relevância como fonte de inserção social, na medida em que as coordenadas geodésicas ajudam à regularização de terras e ao planejamento urbano, passando a funcionar como “endereço” no meio rural. Esse viés social advém do pressuposto de que a Geodesia deixou de ser apenas um sistema de referência e passou a assumir também a função de inclusão e transformação social. Grupos excluídos socialmente, como as comunidades quilombolas e indígenas, vêm conquistando espaços concernentes ao reordenamento territorial a que fazem jus. A implementação de políticas públicas em áreas prioritárias de saúde, educação e habitação, também têm sido conduzidas com a ajuda da Geodesia, ampliando a participação popular nas ações que envolvem a gestão do território (FERREIRA & CARNEIRO, 2008).

Na conjuntura ambiental a ciência geodésica fornece a base para a predição, observação, compreensão e representação de fenômenos associados. Plag & Pearlman (2009), reforçam a importância da infraestrutura propiciada pela Geodesia para fazer frente aos desafios advindos dos processos dinâmicos presentes no Sistema Terra. Um sem número de aplicações permitem contribuições expressivas voltadas à gestão do meio ambiente e dos recursos naturais. Dentre os principais objetivos da Geodesia contemporânea, o monitoramento do ciclo hidrológico merece enfoque.

A Geodesia tem ajudado a conhecer melhor diversos parâmetros presentes no ciclo hidrológico: umidade no solo, infiltração, percolação e descarga de águas subterrâneas servem como exemplos de tais parâmetros. A compreensão desses e

de tantos outros processos correlatos é de fundamental importância à produtividade biológica, abastecimento d'água e alterações do clima (PLAG & PEARLMAM, 2009). A Figura 33 traz um quadro interessante dos principais elementos existentes no ciclo hidrológico global.

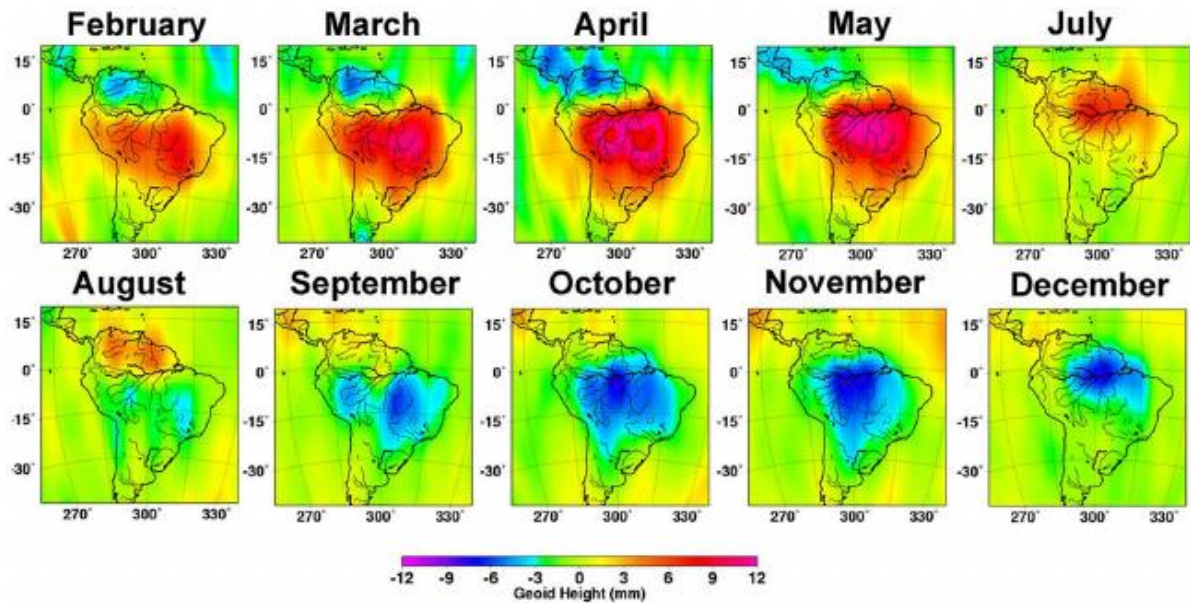
**Figura 33** – Representação esquemática do ciclo hidrológico global



Fonte: Freitas 2016

Adicionalmente, as modernas missões satelitais, com destaque à GRACE, permitem avaliar movimentos sazonais e seculares de massas de água continentais. Esses movimentos podem produzir alguma alteração nas altitudes e na gravidade (ALMEIDA FILHO, 2009). Um exemplo elucidativo é apresentado na Figura 34, mostrando o ciclo e armazenamento d'água que a missão GRACE detectou em território brasileiro, com ênfase na região central e Amazônia, no decorrer do ano de 2004.

**Figura 34** – Alguns resultados oferecidos pela missão GRACE em território brasileiro



Fonte: Tapley et al., 2004

O segmento do agronegócio, primordialmente na Agricultura de Precisão (AP), também tem sido contemplado pela moderna Geodesia. De acordo com o MAPA (2013), a AP pode ser compreendida por um “conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas para permitir um sistema de gerenciamento agrícola, baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva, visando ao aumento de retorno econômico e à redução do impacto ao ambiente”.

As ações empreendidas pelas técnicas de AP, segundo Mantovani et al. (1998), podem ser traduzidas como uma forma de manejo sustentável, extrapolando as premissas básicas de aumento dos índices de produtividade, na medida em que mitigam os efeitos nocivos ao meio ambiente e às reservas naturais. Soares Filho & Cunha (2015), acrescentam que a AP leva em conta as etapas de coleta de dados, gerenciamento da informação, aplicação de insumos e a avaliação econômica e ambiental dos resultados.

As iniciativas voltadas à agricultura de precisão surgiram na década de 1980, conduzidas na Europa e nos Estados Unidos. Entretanto é consensual a premissa de que as práticas de AP foram impulsionadas a partir do uso da tecnologia GPS (MANTOVANI et al., 1998). Na agricultura brasileira a inserção do GPS ocorreu primeiramente na aviação agrícola, em meados dos anos 1990 (MAPA, 2013). Coelho (2008) comenta que, associadas ao GPS, outras geotecnologias colaboraram para o

desenvolvimento da AP, dentre as quais destaca: sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas (SIG).

Embora ainda não haja a disseminação integral dos preceitos da AP em terras brasileiras, conforme apontam Soares Filho & Cunha (2015), são inegáveis as correspondentes contribuições advindas de algum sistema satelital de posicionamento e, por conseguinte, da Geodesia. As diversas fases presentes num ciclo de AP consideram informações geoespaciais (IG) desde as análises preliminares in loco. Os dados coletados são inseridos em um SIG e devidamente analisados, com vistas às decorrentes ações preventivas ou corretivas. A Figura 35 mostra resumidamente as etapas envolvidas em um sistema de AP, onde ficam subentendidas as necessidades posicionais requeridas em cada uma dessas etapas, dadas às distintas variabilidades existentes em locais específicos de uma mesma área de produção.

**Figura 35** – Etapas do ciclo existente na AP que necessitam, direta ou indiretamente, de informações posicionais



**Fonte:** Adaptado de Coelho, 2008

Outros importantes segmentos correlatos que vêm sendo tratados pela ciência geodésica dizem respeito à meteorologia e à climatologia. A partir da década de 1920, ocorreu um grande avanço no monitoramento global do clima através das radiossondas. Tais dispositivos permitiam a obtenção de informações meteorológicas em diversas altitudes. Naquela ocasião havia incertezas quanto às posições das

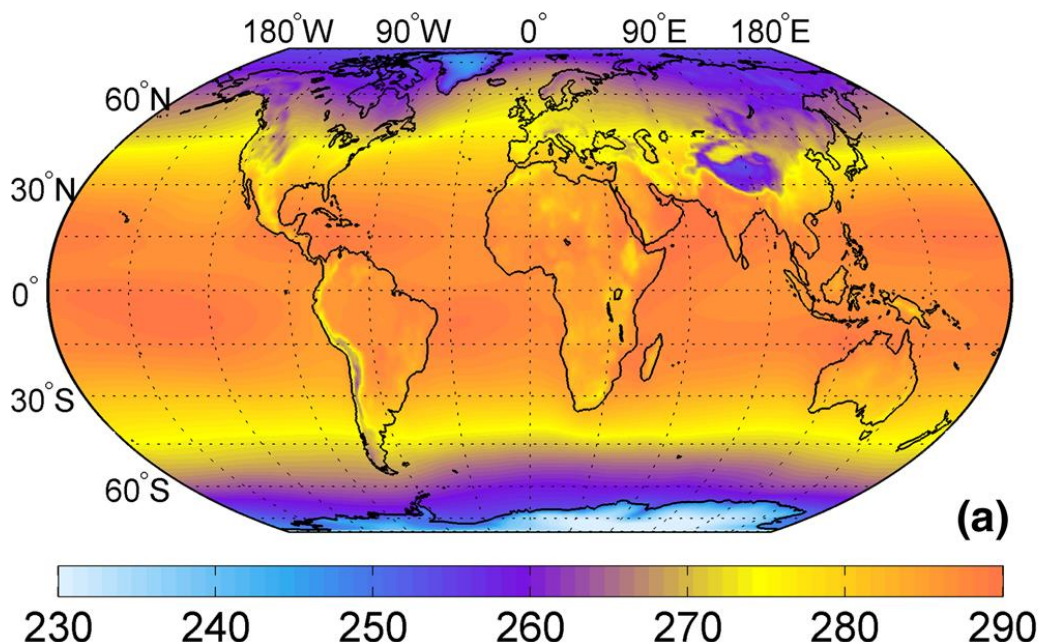
radiossondas acarretando, em última análise, algumas dificuldades na interpretação e validação das informações obtidas. Para amenizar essa problemática os dados meteorológicos eram correlacionados com posições planimétricas aproximadas e as altitudes eram estimadas por meio das pressões atmosféricas correspondentes (GRAHAM et al., 2002).

Esse impasse só foi equacionado com o advento da tecnologia GPS, posteriormente GNSS, permitindo assim que o georreferenciamento dessas informações pudesse ser feito com maior precisão. Em novembro de 2006 a Organização Meteorológica Mundial (OMM) deu mais um passo adiante, ao adotar um referencial geodésico único com abrangência global. Assim, as medições meteorológicas reportadas para a OMM passaram a ser referenciadas ao mesmo sistema utilizado pelo GPS, o *World Geodetic System 1984* (WGS84) (WMO, 2011).

As informações provenientes do GNSS permitem estimar o vapor d'água integrado na atmosfera (I WV, *Integrated Water Vapor*). O monitoramento das variações temporais e espaciais do IWV é importante para os meteorologistas e climatologistas, contribuindo para um melhor desempenho nas previsões do tempo e quantificando as decorrentes influências sobre o clima (SAPUCCI, 2001). Essa técnica se destaca dentre outras disponíveis, pela alta resolução temporal aliado ao baixo custo (id., *ibid.*).

As observáveis GNSS permitem também a concepção de modelos climáticos e atmosféricos, obtidos basicamente através da correlação entre as informações GNSS e dados médios de pressão, temperatura e umidade relativa do ar, informam Pilapanta et al. (2016), a partir de experimentos na América do Sul. A Figura 36 apresenta um dos resultados advindos do modelo *Global pressure and temperature 2 wet* (GPT2w), que abrange todo o planeta (BÖHM, 2015).

**Figura 36** – As diferenças cromáticas evidenciam valores médios das temperaturas, em unidades Kelvin, advindas do modelo global GPT2w



Fonte: Böhm, 2015

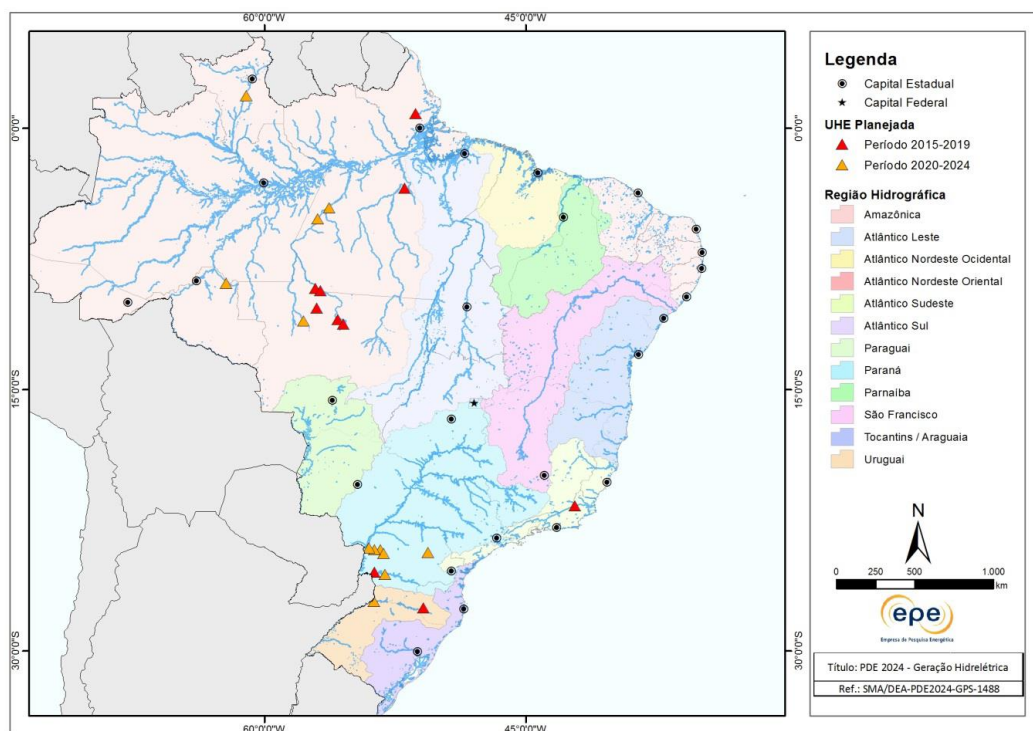
### 2.7.1 Estudo de caso: aplicações geodésicas em Usinas Hidrelétricas

Devido aos expressivos impactos ao meio ambiente e no intuito de melhor contextualizar as modernas aplicações geodésicas, em conformidade com o conteúdo e objetivos desta tese, foi elaborado um estudo de caso vinculado ao segmento energético brasileiro. A partir dessas considerações pretende-se oferecer algumas sugestões de natureza geodésica que possam fazer parte de futuros empreendimentos hidrelétricos nacionais ou transnacionais.

Nas últimas décadas a busca por fontes energéticas eficientes, limpas e renováveis tem sido intensa e conduzida por diversas esferas da sociedade. Vindo ao encontro de tais premissas, a geração de energia hidrelétrica surge como a opção mais usual em terras brasileiras, onde se encontra a maior bacia hidrográfica do mundo. Em que pesem as argumentações favoráveis e contrárias aos empreendimentos hidrelétricos, é importante apresentar argumentos que permitam subsidiar as análises e decorrentes tomadas de decisão. Diante dessa realidade é imprescindível considerar as especificidades oferecidas pela Geodesia nos posicionamentos tridimensionais, com vistas a prevenir, monitorar ou mitigar eventuais impactos socioambientais nos aproveitamentos hidrelétricos.

No que tange ao contexto hidrelétrico, as premissas contidas nas já comentadas diretrizes globais da ONU, vêm sendo gradativamente consideradas no Brasil. Há diversas organizações públicas e privadas que, direta ou indiretamente, se envolvem com a questão. No primeiro escalão governamental destacam-se os Ministérios de Minas e Energia (MME), criado em 1960, e o do Meio Ambiente (MMA), instaurado no ano de 1992. Dentre as instituições federais normativas e fiscalizadoras mais atuantes relacionadas à temática hidroenergética, estão a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), ambas vinculadas ao MME; subordinadas ao MMA, sobressaem a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Também merece evidência o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), incumbido de apontar caminhos para as políticas ambientais. Cabe a essas Organizações a elaboração da maior parte da regulamentação inerente ao segmento hidrelétrico nacional. Em paralelo, algumas entidades governamentais estaduais e municipais também produzem textos legais, gerando uma profusão de normas e diretrizes técnicas que procuram nortear as decorrentes atividades.

Os prognósticos inseridos no Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 indicam uma forte expansão da oferta de energia elétrica, com a implantação de 22 usinas em território brasileiro, nos próximos anos. Desse total, conforme mostra o cartograma da Figura 37, 12 UHE estão localizadas na Amazônia brasileira (EPE, 2015). Se considerarmos todos os países amazônicos, o número de empreendimentos hidrelétricos existentes e planejados na bacia amazônica chega a 431 (LATRUBESSE et al., 2017). Torna-se oportuno observar que é na Amazônia, onde há expressivo potencial hidrelétrico e grandes perspectivas de expansão do mesmo, que se concentra a maior quantidade de áreas preservadas do país. Justamente nessa região, a infraestrutura geodésica proporcionada pelo IBGE é a mais deficiente.

**Figura 37 – Usinas hidrelétricas planejadas no Brasil, por região hidrográfica****Fonte:** EPE, 2015

Conforme menciona o Plano Decenal de Expansão de Energia 2020, a modalidade de geração de energia hidrelétrica deve ser conduzida de forma socioambientalmente sustentável (EPE, 2011). No entanto, as peculiaridades socioambientais produzem desafios adicionais ao segmento energético brasileiro, na medida em que diversos setores da sociedade questionam se os decorrentes impactos e benefícios justificam tais aproveitamentos (EPE, 2015). Há grande complexidade nessas argumentações, trazendo à tona questões dicotômicas importantes, acarretando abordagens intersetoriais e soluções multidisciplinares nas dinâmicas envolvidas nos processos de avaliação e licenciamento ambiental (LATRUBESSE et al., 2017; FEARNSSIDE, 2016a).

Os critérios adotados na avaliação socioambiental proposta pela EPE, observados no Quadro 2, levam em conta as características de cada UHE e da região do empreendimento, considerando os principais impactos e benefícios auferidos. Para tanto, coteja seis indicadores de impactos (ambientais e socioeconômicos) e ainda os três benefícios socioeconômicos mais expressivos. Com base no teor desses indicadores é possível depreender, por exemplo, a correlação entre os impactos mencionados e as inundações dos reservatórios.

**Quadro 2** – Indicadores da avaliação socioambiental de usinas hidrelétricas

| <b>Classificação</b>       | <b>Indicadores</b>                                                                                                                                     |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Impactos ambientais        | perda da vegetação nativa<br>transformação de ambiente lótico em lêntico<br>interferência em unidade de conservação                                    |
| Impactos socioeconômicos   | população afetada<br>interferência em terra indígena<br>interferência na infraestrutura                                                                |
| Benefícios socioeconômicos | geração de empregos<br>incremento temporário na arrecadação municipal (ISS)<br>incremento permanente na arrecadação municipal (compensação financeira) |

**Fonte:** Empresa de Pesquisa Energética

As observações de Latrubesse et al., (2017) antecipam degradações socioambientais em larga escala decorrentes de inundações, caso não seja dado o devido valor às consequências cumulativas produzidas por grandes barragens de UHE. Nesse contexto, os níveis máximos alcançados pelos reservatórios e o conhecimento antecipado das regiões que serão inundadas devem ser claramente evidenciados. Entretanto, para que isso possa realmente ocorrer com precisões plausíveis, os requisitos considerados pela Geodesia com a questão posicional devem ser observados em todos os estudos e fases de implantação de um projeto hidrelétrico, tanto a montante como a jusante das barragens.

No que concerne ao posicionamento horizontal ou planimétrico, expresso pela latitude e longitude, as soluções oferecidas pelo GNSS atendem perfeitamente às necessidades em um Projeto Hidrelétrico. Em contrapartida, a componente vertical ou altimétrica, exige cuidados adicionais e enfoque pormenorizado, pois as altitudes fornecidas diretamente pela tecnologia GNSS, bem como pelos processos usuais de nivelamento, não possuem o significado físico requerido pelo armazenamento em grandes reservatórios e pelo escoamento de volumosas massas d'água.

No rol das etapas existentes na implantação de um empreendimento hidrelétrico são necessárias bases cartográficas em diferentes escalas, que permitem um melhor conhecimento da região e subsidiam os diversos estudos multidisciplinares inerentes ao projeto. Na primeira etapa, denominada de Inventário Hidrelétrico da Bacia Hidrográfica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) exige que a

representação cartográfica se dê na escala de 1:10.000, com exatidão altimétrica de 2,5 metros. Na fase subsequente, voltada aos Estudos de Viabilidade Técnica (EVTE), as áreas abrangidas pelo futuro reservatório também devem ser mapeadas em 1:10.000, enquanto os sítios que requerem maior detalhamento têm que ser representados na escala de 1:2.000, com exatidão altimétrica de 0,5 metros. Essas fases preliminares são fundamentais para a escolha da alternativa mais apropriada numa bacia hidrográfica indicando, em última análise, aquela que apresenta o melhor equilíbrio entre os custos de implantação, benefícios energéticos e impactos ambientais.

Num aproveitamento hidrelétrico há inúmeras atividades que requerem informações altimétricas confiáveis e atreladas a um único referencial. No Brasil isso implica em afirmar a obrigatoriedade de se levar em conta apenas altitudes ortométricas, referenciadas unicamente ao Sistema Geodésico Brasileiro. Por conseguinte, as diretrizes normativas elaboradas pela ANEEL preconizam a necessidade de se referenciar todos os levantamentos em estações vinculadas ao Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, no caso da planimetria, e DVB-I, com relação às altitudes (ANEEL, 2009).

Conforme dispõe a ANEEL (2009), além dos levantamentos destinados às possíveis modalidades de bases cartográficas, diversas medições altimétricas se fazem necessárias a fim de georreferenciar elementos importantes e compor o relatório final dos estudos e projetos a serem submetidos à devida avaliação. Destacam-se algumas aplicações:

- elaboração e posterior materialização das curvas voltadas à desapropriação;
- determinação do perfil longitudinal do rio principal e, quando for o caso, de seus maiores afluentes, evidenciando-se os controles hidráulicos em cachoeiras e corredeiras;
- avaliação de interferências do reservatório em áreas urbanas, rurais, indígenas, unidades de conservação, etc;
- avaliação de interferências da área inundada do reservatório nos equipamentos de infraestrutura da UHE;
- amarrações de sítios propensos a investigações geológicas, geotécnicas, hidrométricas e ambientais;

- amarração de seções topobatimétricas nas áreas do futuro reservatório para avaliação do remanso e definição do posicionamento das principais estruturas (p. ex., barragem, circuito de adução, casa de força e canais em geral); e
- posicionamento das réguas limnimétricas.

Conforme já foi mencionado em capítulos anteriores desta tese, as altitudes ortométricas são obtidas a partir da RAAP ou através de receptores GNSS com a devida redução à superfície geoidal pelas ondulações geoidais. Também já foi comentado que o arcabouço geodésico oferecido pela RAAP não se faz presente em grande parte do território brasileiro, acarretando a eventual medição de extensas linhas de nivelamento geométrico geodésico, desde alguma “RN confiável” até a região da UHE. Esses procedimentos, na maioria das vezes, são inviáveis ou antieconômicos.

A expressão “RN confiável” está correlacionada ao fato da RN não ter sofrido abalos que possam ter modificado a posição da estação ou ainda pertencer a um circuito altimétrico que atenda às tolerâncias de alta precisão estipuladas pelo IBGE. Mesmo que sejam observadas tais especificações no tocante à obtenção de altitudes ortométricas pela RAAP, existe ainda outra questão a ser considerada que não está suficientemente clara nas diretrizes técnicas: as altitudes disponibilizadas pela RAAP ainda não possuem conotação física e precisam ser agregadas a informações gravimétricas.

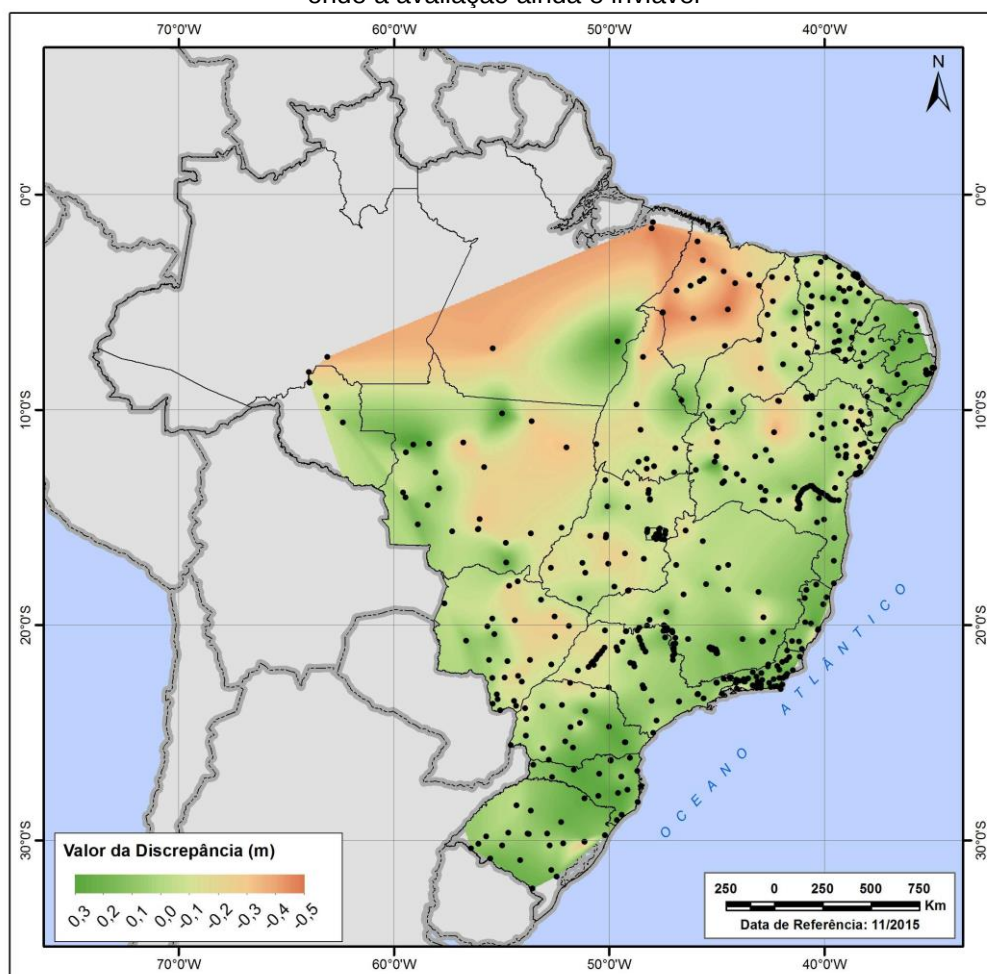
Para fazer frente a tais exigências e dificuldades o que acaba ocorrendo, na grande maioria dos casos, é que a infraestrutura geodésica altimétrica, à semelhança da planimétrica, também seja contemplada pelo GNSS. Isso se dá basicamente por meio da determinação de altitudes geométricas para uma ou mais estações que servem de referência ao empreendimento hidrelétrico, comumente denominada rede de vértices geodésicos (RVG). Dessas estações pertencentes à RVG, partem os levantamentos de desníveis e declividades conduzidos em todas as fases do projeto hidrelétrico. Adicionalmente a RVG subsidia as atividades de auscultação geodésica de estruturas e também aquelas voltadas aos diagnósticos preventivos de inundação à jusante das barragens.

Indo mais adiante, a regulamentação oferecida pela ANEEL (2009) e ANA (2013) estabelece que as altitudes advindas do GNSS tenham a devida compensação geoidal, isto é, deixem de ser referenciadas à superfície elipsoidal e passem a se referir ao geoide, através de algum modelo geoidal. Das diversas modalidades de

modelos geoidais a que oferece maior vínculo com o armazenamento e deslocamento de massas d'água e, por conseguinte, com o campo de gravidade terrestre, considera como insumo básico a medição da aceleração de gravidade.

A última versão do modelo geoidal nacional, o MAPGEO2015, em tese, deveria contemplar tais exigências em todo território nacional, transformando as altitudes geométricas em ortométricas com precisões compatíveis com as necessidades demandadas pelas UHE. Contudo, isso acaba não ocorrendo devido basicamente a duas limitações. A primeira delas diz respeito à impossibilidade de que a qualidade do referido modelo seja avaliada em uma boa parcela do país, pela simples razão de não existirem estações da RAAP para a devida avaliação. A Figura 38 denota essa particularidade do MAPGEO2015.

**Figura 38** – Estações da RAAP usadas na validação do MAPGEO2015, denotando a extensa área onde a avaliação ainda é inviável



Fonte: Blitzkow et al., 2016

A segunda limitação reflete as heterogeneidades existentes na infraestrutura gravimétrica propiciada pelo IBGE e vem de encontro às diretrizes contidas nas orientações técnicas para atualização das CAVs, emitidas pela ANA, pressupondo que o modelo geoidal a ser utilizado deve apresentar uma qualidade posicional melhor que 20 cm (ANA, 2013). Tais recomendações dificultam ainda mais as possíveis soluções em parte considerável do território brasileiro, na medida em que as últimas versões dos modelos geoidais nacionais extrapolam essas tolerâncias e não oferecem a mesma consistência em todos os recantos do país. A Tabela 3 mostra a melhoria da consistência do MAPGEO2015 com relação à versão anterior; ainda assim, as respectivas diferenças padrão máximas e mínimas estão fora das tolerâncias prescritas pela ANA.

**Tabela 3** – Dados da análise estatística dos dois últimos modelos geoidais nacionais evidenciando as diferenças padrão máximas e mínimas correspondentes, bem acima da tolerância exigida pela ANA

| GNSS / RN         | Média | RMS  | Dif. Máx | Dif. Mín |
|-------------------|-------|------|----------|----------|
| <b>MAPGEO2015</b> | 0,00  | 0,17 | 0,49     | -0,49    |
| <b>MAPGEO2010</b> | -0,03 | 0,21 | 0,90     | -0,75    |

Fonte: Blitzkow et al., 2016

Na medida em que o modelo geoidal brasileiro reflete as deficiências e limitações do SGB e nem sempre atende às exigências requeridas de precisão, a alternativa mais conveniente, preconizada pelas orientações técnicas e defendida no contexto desta tese, passa a ser a elaboração de um modelo geoidal específico para a região do empreendimento hidrelétrico. Entretanto, a disponibilidade desse modelo que permita efetuar a compensação geoidal das altitudes, por si só, não resolveria todos os problemas que incidem em uma UHE.

Conforme já mencionado, um modelo geoidal possibilita a obtenção das ondulações geoidais e a decorrente transformação de altitudes geodésicas, auferidas por receptores GNSS, em altitudes ortométricas. Entretanto, isso é aplicável apenas nos diversos levantamentos conduzidos com os receptores satelitais de posicionamento. Em contrapartida, numa UHE há aplicações altimétricas que são desenvolvidas através de nivelamento geométrico ou, em alguns casos que requeiram menor precisão, com o uso do nivelamento trigonométrico, empregando-se para tanto teodolitos ou estações totais.

Nos levantamentos que produzem altitudes niveladas o que se obtém, em última análise, são os desníveis entre estações, transportando altitudes sem a necessidade de se levar em conta diretamente a compensação geoidal. As instruções normativas preveem que isso venha a ocorrer, pressupondo que as altitudes ortométricas que originaram esses desníveis já tenham sido compensadas por um modelo geoidal ou estejam vinculadas ao SGB. Contudo, se esses nivelamentos abrangem maiores extensões, normalmente superiores a 10 km, existe a necessidade de se agregar informações gravimétricas às altimétricas com vistas a transformar desníveis métricos em diferenças de potencial (FREITAS & BLITZKOW, 1999).

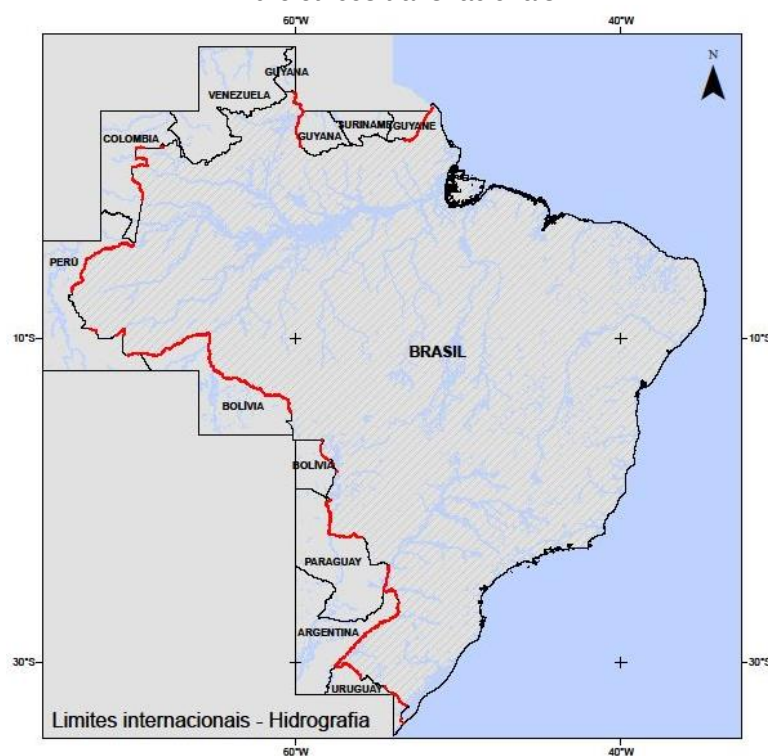
As razões que motivam a obtenção de diferenças de potencial estão intimamente correlacionadas ao armazenamento e movimentos de massas d'água (BLITZKOW et al., 2004). Cabe ressaltar que a superfície que representa o nível de água de um grande reservatório não possui a mesma altitude, mas sim o mesmo potencial (BLITZKOW, 2017). Por conta desse pressuposto, determinadas ações direcionadas ao monitoramento dos níveis que um reservatório hidrelétrico pode atingir devem considerar o campo de gravidade terrestre e, por conseguinte, os números geopotenciais. Essas ações ganham especial relevância em regiões planas ou com suaves oscilações topográficas, onde a variação de poucos decímetros pode inundar áreas extensas e produzir danos sociais, econômicos e ambientais irreversíveis.

Para que as diretrizes técnicas sejam devidamente consideradas, há a necessidade de que os textos normativos vigentes sejam suficientemente claros e exequíveis. Contudo, isso nem sempre ocorre, ocasionando contradições inoportunas e duvidosas. De acordo com a ANA (2013) e a ANEEL (2009), as altitudes devem ser obrigatoriamente transportadas aos marcos da RVG a partir de estações pertencentes ao SGB. Nas mesmas orientações técnicas consta que as altitudes oriundas do GNSS podem ser aceitas, desde que compensadas pelas ondulações geoidais; entretanto, essas altitudes nem sempre estarão referenciadas diretamente ao DV-I, conforme preconizado e exigido. Essa pequena incoerência conceitual é explicada pelo fato do MAPGEO2015 não possuir vínculo direto com o DV-I, na medida em que em sua elaboração não há injunções que assegurem tal vinculação. Em alguns casos, onde as altitudes da RAAP são usadas para o cálculo das anomalias, pode haver alguma pequena dependência, entretanto isso não permite assegurar que as ondulações

geoidais e as altitudes ortométricas resultantes estejam realmente referenciadas ao DV-I.

As intenções das empresas governamentais normativas brasileiras pressupõem que as altitudes consideradas nos empreendimentos hidrelétricos sejam vinculadas unicamente ao SGB. No entanto, não existe clareza de como se deve proceder com relação aos aproveitamentos situados nas regiões fronteiriças, onde os referencias altimétricos dos países vizinhos são distintos. Segundo o Ministério das Relações Exteriores (MRE), são mais de nove mil quilômetros de cursos d'água que limitam o território brasileiro com as nações vizinhas. A Figura 39 mostra esquematicamente essa realidade. Além disso, inúmeros tributários brasileiros e estrangeiros afluem para nossos rios fronteiriços. De acordo com estimativas da ANA, existem 83 cursos d'água fronteiriços ou transfronteiriços no Brasil (SAE, 2013). Todo esse imenso complexo hidrológico existente nas regiões adjacentes às fronteiras oferece abundantes condições de geração de energia. Porém, se não houver uma única origem altimétrica que referencie os aproveitamentos hidrelétricos transfronteiriços, inundações imprevistas podem provocar adversidades geopolíticas indesejáveis com os países limítrofes.

**Figura 39** – Hidrografia fronteiriça, denotando a possibilidade de futuros aproveitamentos hidrelétricos transnacionais



Fonte: BCIM / IBGE

Um exemplo dessa modalidade de problema está ocorrendo no remanso da UHE de Jirau, às margens do rio Madeira, onde poderá haver a inundação do território boliviano em uma extensão maior do que o previsto, deixando apreensivas as autoridades de ambos os países (FEARNSIDE, 2014). Outras inconveniências similares poderão vir à tona nos próximos anos, devido às perspectivas de construção de cinco grandes hidrelétricas na Amazônia peruana, próximas à fronteira com o Brasil; por conta desses empreendimentos está prevista a inundação de um trecho da recém-construída e controvertida Rodovia Interoceânica (SANT'ANNA, 2011).

Diante desse quadro, em que mais de uma nação acaba sendo envolvida, Latrubesse et al., (2017) propõem que as ações com vistas à integração energética entre os países latino-americanos sejam analisadas pela Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA). Sant'Anna (2011, p.17) contra argumenta, mencionando que “[...] a OTCA pouco se relaciona com as iniciativas fronteiriças e não possui mecanismos de participação para estes atores em sua estrutura, o que contradiz o conceito de governança”. Acrescenta ainda (id., Ibid.), que outras modalidades de acordos internacionais de cooperação nem sempre auferem benefícios à questão ambiental, tendo em vista os graves impactos que um aproveitamento hidrelétrico pode produzir.

Com base nessas constatações controversas, fica evidenciada a necessidade de mecanismos eficazes e apropriados às regiões transfronteiriças, voltadas à criação de uma política efetiva para a gestão dos recursos hídricos. Cabe observar que as iniciativas locais, no âmbito das bacias hidrográficas, não têm força legal que acarrete o comprometimento das instituições envolvidas, pois dependem da atuação dos respectivos Ministérios de Relações Exteriores e da assinatura de acordos internacionais (SANT'ANNA, 2011).

A Carta Magna brasileira estabeleceu a obrigatoriedade de Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA), para obras ou atividades potencialmente causadoras de significativa degradação do meio ambiente; esse texto constitucional retrata o disposto originalmente pela Resolução CONAMA nº 001, que condiciona a autorização para implantação de uma UHE à apresentação do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), (CONAMA, 1986). Posteriormente, a Resolução CONAMA nº 237 amplia as exigências de EIA e RIMA para a construção de outras barragens e diques, estabelecendo competências de fiscalização e expedição de licenciamento em função

da abrangência espacial dos empreendimentos e dos potenciais impactos ambientais (CONAMA, 1997).

Avaliações multidisciplinares, com abrangências espaciais mais amplas, permitem uma visão integrada e eficiente dos aspectos socioambientais e dos impactos bióticos nas comunidades ribeirinhas (MMA, 2006). Em contrapartida, a principal ferramenta existente no Brasil e em alguns países amazônicos para auxiliar nas ações de governança e subsidiar o licenciamento ambiental é a Avaliação de Impacto Ambiental Local, restringindo as análises a um aproveitamento hidrelétrico específico (LATRUBESSE et al., 2017).

Seguindo raciocínio análogo, as soluções apontadas pela Geodesia também devem ser vistas de forma ampla e integrada, com referenciais que desconsideram as limitações impostas pelas fronteiras entre os países. Iniciativas nesse sentido já estão sendo conduzidas pelo Comitê SIRGAS, que dariam respaldo aos empreendimentos fronteiriços e transfronteiriços na América Latina. Em termos mais amplos, a Associação Internacional de Geodesia tem envidado esforços com vistas à integração altimétrica global, a exemplo do que ocorre com as coordenadas planimétricas, por meio do IHRF (SANCHEZ et al., 2015). Todavia, não obstante tais iniciativas, os mecanismos de controle altimétrico adotados nos empreendimentos de cada nação, ainda levam em conta o respectivo Sistema Vertical de Referência Nacional (SVRN), cujas expressivas diferenças já foram comentadas nesta tese.

O que se depreende, após análise das particularidades contidas na regulamentação voltada ao licenciamento ambiental, é que as instituições governamentais envolvidas com o tema parecem estar preocupadas com a sustentabilidade ambiental. Entretanto, não há exigências específicas que apontem para a necessidade de se levar em conta alguns preceitos geodésicos fundamentais na elaboração dos principais instrumentos de análise integrada de um aproveitamento hidrelétrico, traduzidos por um EIA e RIMA. Ampliando essa argumentação, as análises oferecidas por Fearnside (2016) trazem à tona importantes questionamentos sobre algumas deficiências contidas no licenciamento ambiental de hidrelétricas brasileiras.

Ao se considerar a necessidade de um único referencial geodésico nos EIA / RIMA de uma UHE, estará implícita uma abrangência regional, nacional ou mesmo continental, dependendo das soluções altimétricas adotadas. Esse referencial único acaba tendo um caráter ainda mais estratégico, na medida em que possibilita análises

envolvendo mais de uma UHE num mesmo curso d'água ou em uma mesma bacia hidrográfica. Vale ressaltar que, idealmente, as avaliações ambientais locais devem ser desconsideradas e substituídas por avaliações integradas, de abrangência regional, com vistas a maior eficiência em seus diagnósticos (LATRUBESSE et al., 2017; MMA, 2006).

Pelo exposto, fica evidente que as questões altimétricas nas UHE demandam maiores reflexões e exigem soluções particularizadas. Não se trata apenas de uma situação ideal, onde se busca a melhor opção para um determinado empreendimento, existem normas que devem ser atendidas, em que pesem as eventuais dificuldades e pequenas contradições. Indo ao encontro dessas premissas, apresenta-se ao final da tese, uma proposta de inserção de quatro recomendações de natureza geodésica nos EIA / RIMA, respaldadas em orientações técnicas da ANA e ANEEL, com vistas a subsidiar os levantamentos geodésicos, batimétricos, topográficos e cartográficos, essenciais em um aproveitamento hidrelétrico de médio ou grande porte.

### **3 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

As discussões conduzidas nesta tese tiveram como elementos principais as interações da Geodesia com outras ciências e atividades humanas. Ênfase natural foi dada à Gravimetria, diante da crescente importância desse tema no cenário global e do envolvimento pregresso do autor com essa tecnologia. Indo ao encontro dos princípios preconizados pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFG, foi evidenciado, amiúde, o caráter interdisciplinar envolvendo a temática abordada.

O primeiro capítulo, destinado à fundamentação teórica, foi concebido a fim de subsidiar a tese com conceituações pertinentes. Pretendeu-se, ainda, nessa seção, trazer à tona algumas das principais interações entre a Geodésica e a esfera ambiental. Ao final do capítulo, foi oferecido um estudo de caso sobre as aplicações geodésicas em Usinas Hidrelétricas. Com base nas considerações apresentadas no decorrer desse texto, são efetuadas quatro recomendações de natureza geodésica, objetivando subsidiar as ações concernentes aos futuros licenciamentos ambientais de hidrelétricas no Brasil:

### 1ª. Altitudes com referências arbitrárias.

No que tange à obrigatoriedade de vinculação ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), isso já tem sido observado usualmente nas coordenadas planimétricas, expressas pela latitude e longitude, pois os processamentos advindos do GNSS levam em conta o referencial planimétrico do SGB, ou seja, o mesmo do SIRGAS. Todavia, na componente altimétrica esse aspecto ainda suscita dúvidas. Enquanto não houver o estabelecimento de um único sistema altimétrico continental ou global, a utilização de altitudes com referências arbitrárias deve ser coibida. É imprescindível que a origem das altitudes niveladas seja vinculada à RAAP e, portanto, ao *Datum* Brasileiro de Imbituba.

### 2ª. Altitudes determinadas por GNSS.

Nos casos em que as altitudes forem obtidas por GNSS, situação passível de ocorrer em uma grande parcela do território brasileiro, a compensação geoidal deve ser efetuada obrigatoriamente através de modelos geoidais que contemplem as tolerâncias posicionais estipuladas pela ANA de 0,20 m. No caso do MAPGEO2015 não atender a essa precisão, um modelo geoidal regional ou local deverá ser elaborado. Nas circunstâncias em que a região da UHE não disponha de RRNN da RAAP para permitir a avaliação absoluta desse modelo geoidal, o que também é comum ocorrer, alguma avaliação relativa com as estações niveladas existentes no empreendimento deverá ser procedida, a fim de assegurar a consistência interna do modelo usado. Dar-se-á preferência aos modelos geoidais que considerem informações gravimétricas em sua elaboração ao invés de superfícies corretoras advindas das diferenças entre altitudes geométricas e ortométricas.

### 3ª. Números geopotenciais.

Nas circunstâncias em que as medições altimétricas estiverem sendo empregadas para avaliar até onde os níveis operacionais e máximos dos reservatórios podem alcançar, é recomendável que haja a devida inserção de medições gravimétricas em conjunto com os desníveis altimétricos, com vistas às determinações de diferenças de potencial através de números geopotenciais. Tais procedimentos foram mencionados na seção 2.3 desta tese.

#### 4ª. Empreendimentos transfronteiriços.

Naqueles empreendimentos hidrelétricos realizados em rios fronteiriços ou transfronteiriços, cuidados altimétricos adicionais devem ser observados pelos países limítrofes. Caso a opção seja enlaçar a RVG nos respectivos SVRNs, faz-se necessário compatibilizar as diferenças correspondentes entre os dois sistemas e disponibilizar as altitudes em ambos os SVRNs envolvidos. Se ainda não houver alguma avaliação oficial das diferenças entre os SVRNs, promovida pelas respectivas Instituições Geodésicas Nacionais, é importante definir essas magnitudes a partir dos marcos altimétricos existentes na região de trabalho, através de circuitos específicos para tal finalidade. Ao se optar pelo uso de altitudes GNSS, o MAPGEO2015 poderia servir para a devida compensação geoidal, haja vista que este modelo é uma parte do modelo continental. Contudo, na hipótese da precisão do MAPGEO2015 não atender às tolerâncias especificadas e um modelo geoidal gravimétrico regional ou local tiver que ser elaborado, é preciso observar se há distribuição homogênea da densificação gravimétrica abarcando ambos os países. A avaliação desse eventual modelo transnacional deverá ser procedida considerando-se as eventuais divergências entre os SVRNs dos países limítrofes.

Posteriormente aos quesitos contidos na fundamentação teórica e neste texto conclusivo, estão anexados os cinco artigos propostos, inseridos em apêndices distintos, onde são tratadas e discutidas parte das principais questões que compõem a tese.

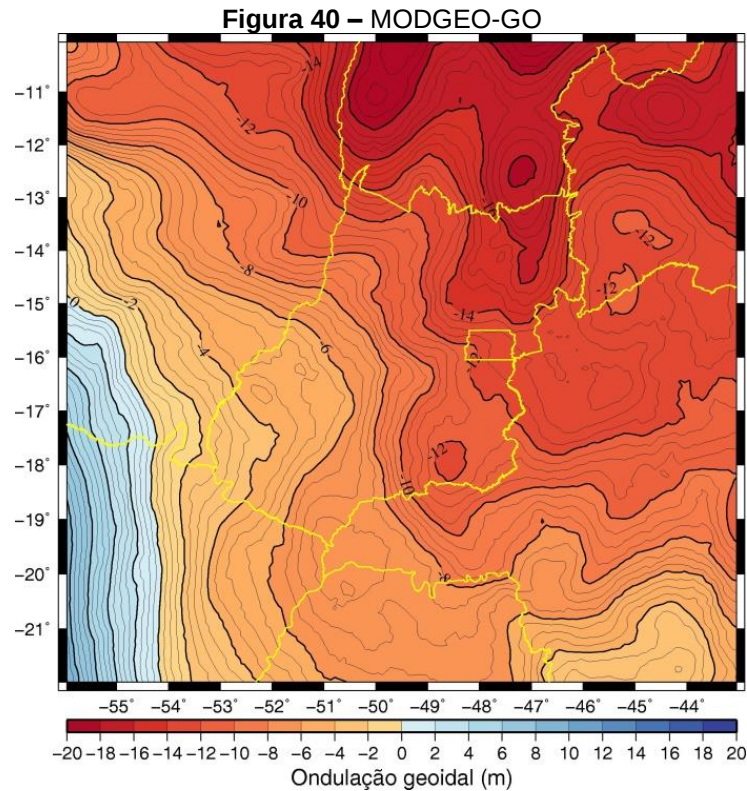
O primeiro desses artigos, “EVOLUÇÃO DA INFRAESTRUTURA GRAVIMÉTRICA NO BRASIL”, propiciou uma contribuição histórica à tese, na medida em que discorreu sobre a tecnologia envolvida nas medições gravimétricas terrestres, aéreas, marinhas e espaciais. Paralelamente, apresentou uma retrospectiva das atividades empreendidas pelas principais instituições brasileiras envolvidas com a gravimetria, chegando até aos dias atuais. Adicionalmente, aventou perspectivas futuras no complexo cenário gravimétrico nacional.

O segundo artigo, denominado “A DISTRIBUIÇÃO DA REDE GRAVIMÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO HUMANO NACIONAL”, permitiu uma interessante análise da correlação existente entre a cobertura gravimétrica e o IDH das mesorregiões brasileiras. Evidenciou ainda, a desigual distribuição das EEGG nacionais, apontando as regiões com arcabouços gravimétricos mais densos e, em contrapartida, os vazios gravimétricos ainda existentes no Brasil. Como complemento, alertou-se para a

necessidade de que os países amazônicos busquem alternativas eficazes para contemplar aquela região com a desejável infraestrutura geodésica, com vistas ao estabelecimento de um consistente Sistema Vertical de Referência.

Um terceiro artigo discorre sobre a “ANÁLISE DE DADOS DA MISSÃO GRACE E DA REDE SIRGAS PARA O MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS DO BRASIL”. As contribuições científicas que este artigo pretendeu oferecer são concernentes com aspectos vinculados à segurança hídrica nacional, a partir de um relacionamento matemático entre as informações altimétricas de estações da rede SIRGAS e os dados de espessura equivalente de água provenientes da missão GRACE. Nesse sentido, propõe-se criar mecanismos que permitam quantificar a presença de água no solo a partir da observação da variação altimétrica ao longo do tempo, indicando tendências que permitam auxiliar no monitoramento voltado à prevenção e redução dos efeitos das secas e inundações no Brasil.

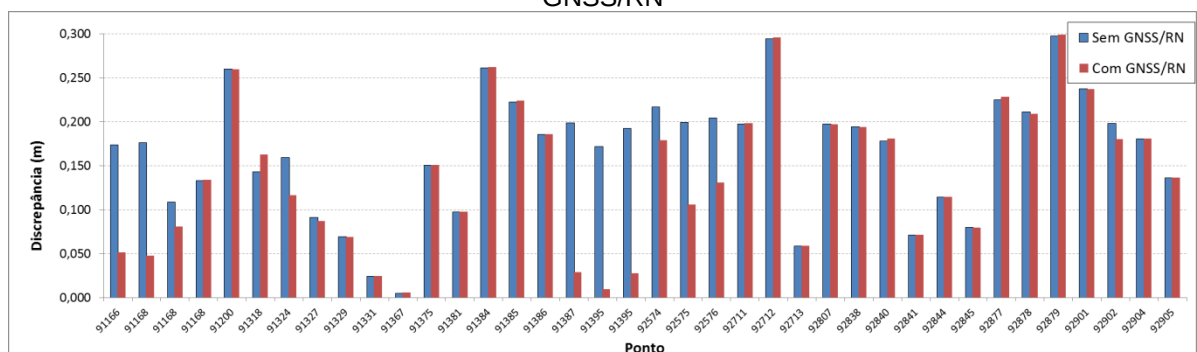
O quarto artigo, intitulado “O MODELO GEOIDAL DE GOIÁS – MODGEO-GO”, apresenta um novo modelo geoidal abrangendo o território estadual goiano. Para a sua elaboração foram consideradas mais de 32 mil estações gravimétricas terrestres, sendo 4600 estabelecidas entre os anos de 2013 e 2017. Durante o processamento houve a utilização de modelos globais do geopotencial com graus e ordens 200 e 250, possibilitando análises interessantes. Os resultados encontrados, visualizados no cartograma da Figura 40, foram alvissareiros e denotaram ganhos qualitativos ao novo modelo. Foram sugeridas também algumas investigações, principalmente nas circunvizinhanças da Serra de Caldas Novas.



Fonte – O autor

O quinto e último artigo versa sobre a “INTEGRAÇÃO DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL NO AJUSTE DO MODELO GEOIDAL PARA O ESTADO DE GOIÁS”, conjecturou-se a possibilidade de se utilizar RRNN da RAAP para melhorar o relacionamento entre o modelo geoidal e a RAAP. A integração dos dados (ondulações do modelo geoidal + ondulações das RRNN) se deu por meio de funções *Thin Plate Spline* (TPS). Os resultados alcançados, mostrados na Figura 41, sugerem que houve uma redução das discrepâncias das ondulações geoidais, após a incorporação de RN do cálculo do modelo, em cerca de 80% das estações de verificação.

**Figura 41 –** Discrepâncias nos pontos de verificação do MAPGEO2015, antes e após o controle com GNSS/RN



Fonte: Magna Junior et al, (2017)

Uma análise numérica foi realizada identificando que houve uma redução de aproximadamente 33% nos valores das discrepâncias. Dessa forma, havendo qualidade e compatibilidade entre o modelo geoidal e estações GNSS/RN, é possível a integração desses dados por meio de funções TPS. Outro ganho advindo dessa integração está na possibilidade de vinculação das altitudes modeladas ao Datum Vertical de Imbituba, assegurando maior aderência à RAAP e ao SGB. Destarte, os futuros modelos geoidais poderão ter maior consistência.

Adicionalmente foi averiguada a premissa de que o modelo de interpolação global, com efeito local, TPS, poderia contribuir com a melhor interpolação de um modelo geoidal quando comparada à interpolação bilinear. As análises estatísticas foram efetuadas utilizando-se os dados provenientes do MODGEO-GO e os resultados foram praticamente iguais, conforme se observa na Tabela 4.

**Tabela 4 –** Comparação entre a interpolação bilinear e por TPS

| <b>Discrepâncias (m)</b> | <b>Bilinear</b> | <b>TPS</b> |
|--------------------------|-----------------|------------|
| <b>Mínima</b>            | -0,300          | -0,297     |
| <b>Máxima</b>            | 0,220           | 0,218      |
| <b>Média</b>             | -0,121          | -0,121     |
| <b>RMS</b>               | 0,159           | 0,160      |

**Fonte:** O autor

Os resultados equivalentes se justificam pela variação tênue da superfície geoidal, o que faz com que, em um grid de 5' x 5', o método de interpolação não tenha grande significância no resultado. Uma influência maior da interpolação pode ocorrer no cálculo do modelo, ou seja, na interpolação das anomalias de Bouguer. Análise essa que se recomenda para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA FILHO, F. G. V. **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: Aplicação na bacia Amazônica**. 2009. 164f. Tese (Doutorado em Engenharia de transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10112009-094808/pt-br.php>. Acesso em: 19 mar 2018.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Agência Nacional de Águas; Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica (SGH). 40p.: il. Brasília, 2013. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas\\_Cota\\_Area\\_Volume\\_Versao\\_Dez2013.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaAtualizacaoDasCurvas_Cota_Area_Volume_Versao_Dez2013.pdf). Acesso em: 19 ago 2017.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Diretrizes para Elaboração de Serviços de Cartografia e Topografia**. Mar, 2009. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/655808/0/Diretrizes+Topogr%C3%A1ficas/23c1183a-b20f-412b-a78f-b9e8940dfadd>. Acesso em: 17 jan 2017

ARAÚJO, V.H.O. **Usabilidade de geoportais: o caso do visualizador da infraestrutura nacional de dados espaciais (INDE)**. Rio de Janeiro, 2016. 172p. Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia de Defesa. Instituto Militar de Engenharia, IME.

ARAÚJO, V.O.H.; AZEVEDO, J.B. **Aspectos das Iniciativas Internacionais**. Reunião do Grupo GGIM. IBGE-DGC. Rio de Janeiro, 25 de Março de 2014.

AUGUSTO M.J.; ARAÚJO, V.H.O. O Comitê de Especialistas das Nações Unidas em Gestão da Informação Geoespacial Global (UN-GGIM). **Bahia Análise & Dados**, v.25, n.4, p.715-725, out / dez 2015. Publicada pela Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Salvador, 2016. ISSN 0103 8117.

BARLIER, F.; LEFEBVRE, M. A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences. In: **The century of space science**. Springer Netherlands, 2001. p. 1623-1651.

BEVIS, M.; BROWN, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. **Journal of Geodesy**, 88(3), 283–311. <http://doi.org/10.1007/s00190-013-0685-5>. Springer, 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00190-013-0685-5.pdf>>. Acesso em: 01 out 2017.

BLITZKOW, D. **Aspectos referentes às modernas missões espaciais e UHEs**. [informação pessoal]. Comunicação pessoal em reunião ocorrida no dia 17 jan 2017.

\_\_\_\_\_. **A Evolução dos Referenciais Usados em Geodésia - A Era Moderna**. Edição revisada do artigo publicado no Boletim de Ciências Geodésicas,

vol 8, no. 1, pp. 3 - 16. Curitiba, março de 2007. Disponível em:  
<http://sites.poli.usp.br/ptr/lgtg/FTP/Cartrefer-v2.pdf>. Acesso em: 14 out 2016.

BLITZKOW, D.; CAMPOS, I. O.; FREITAS, S. R. C. **Altitude: O que interessa e como equacionar**. Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, Recife, 2004.

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.C.; MACHADO, V.C.; NUNES, M.A.; LENGGRUBER, N.V.; XAVIER, E.M.L.; FORTES, L.P.S. MAPGEO2015: O Novo Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 68, n. 10, p. 1873–1884, 2016.

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.C. A Evolução dos Referenciais Usados em Geodésia: A Era Moderna. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 8, n. 1, 2005.

BÖHM, J.; MÖLLER, G., SCHINDELEGGER, M; PAIN, G.; WEBER, R. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). **GPS Solutions**. Springer, 2015, Volume 19, Number 3, Page 433-441. DOI 10.1007/s10291-014-0403-7. Disponível em:  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10291-014-0403-7.pdf>. Acesso em: 29 out 2017.

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Decreto nº 6.666, de 27 de novembro de 2008**. Institui, no âmbito do Poder Executivo federal, a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - INDE, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 nov. 2008. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2008/decreto/d6666.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6666.htm)>. Acesso em: 04 dez 2016

BRUNINI, C.; GALVÁN, R.; SÁNCHEZ, L; H. DREWES, H.; GENDE, M. **Análisis de los movimientos verticales estacionales en la red SIRGAS**. Simposio SIRGAS 2016. Quito, Equador. Instituto Geográfico Militar de Ecuador. 16-18 nov, 2016.

CASTRO JÚNIOR, C. A. C. **Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul**. São Paulo, 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27072007-150539/>>.

COELHO, A.M. **Agricultura de precisão em sistemas agrícolas. In Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, p. 1063-1083, 2008.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº 1**, de 23 de janeiro de 1986. Publicada no DOU, de 17 de fevereiro de 1986, Seção 1, páginas 2548-2549. Disponível em:  
 <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=23>>. Acesso em: 02 jun 2017.

CONAMA, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº 237**, de 19 de dezembro de 1997. Publicada no DOU nº 247, de 22 de dezembro de

1997, Seção 1, páginas 30841-30843 Disponível em:  
<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=237>. Acesso em: 02 jun 2017.

CONCAR. COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA. **Plano de Ação para Implantação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais**. Rio de Janeiro: Comitê de Planejamento da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, 2010.

CORDANI, U. G. As Ciências da Terra e a Mundialização das Sociedades. **Estudos Avançados**. v. 9, n. 25, p. 13-27, 1995. DOI: 10.1590/S0103-40141995000300003. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/250983516\\_As\\_Ciencias\\_da\\_Terra\\_e\\_a\\_mundializacao\\_das\\_sociedades](https://www.researchgate.net/publication/250983516_As_Ciencias_da_Terra_e_a_mundializacao_das_sociedades).

COSTA, S.M.A.; SILVA, A.L.; LIMA, M.A.A.; MOURA JÚNIOR, N.J. Centro de Análise SIRGAS – IBGE : novas estratégias de processamento e combinação , e a influência da mudança do referencial. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 18, no 1, p.63-85, jan-mar, 2012. Disponível em:  
[www.redalyc.org/service/redalyc/downloadPdf/3939/393937723004/6](http://www.redalyc.org/service/redalyc/downloadPdf/3939/393937723004/6)>. Acesso em: 03 out 2017.

COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C. DE; BLITZKOW, D. Validation of the Land Water Storage from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) with Gauge Data in the Amazon Basin. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1982-21702012000200006&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1982-21702012000200006&script=sci_abstract)>. Acesso em: 01out2017.

COYAGO R.R.D. **Ajuste de la red de control basico vertical en funcion de numeros geopotenciales**. Sangolquí, Ecuador, 2010. 108 f. Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniería, Ingeniería Geografica y del Medio Ambiente. Escuela Politecnica del Ejército.

CRISPIM, I.M.M. **Sustentabilidade Ambiental: com foco na eficiência energética na Universidade Federal de Goiás-Regional Catalão**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Organizacional) Universidade Federal de Goiás Regional Catalão, Programa de Pós Graduação em Gestão Organizacional. Catalão-GO. 2016, 65 p. Disponível em:  
[http://ppggo.sistemasph.com.br/images/documentos/dissertacoes/2014/ISADORA\\_MARIA\\_MELO\\_CRISPIM.pdf](http://ppggo.sistemasph.com.br/images/documentos/dissertacoes/2014/ISADORA_MARIA_MELO_CRISPIM.pdf)>. Acesso em: 28 mar 2017.

DEHLINGER, P. **Marine Gravity**. Amsterdam, 1978. 322f. Elsevier Scientific Publishing Company. Disponível em: <<http://www.leituraspdf.com.br/livros/marine-gravity>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

DREWES, H. **Structure and main objectives of the International Association of Geodesy (IAG)**. Simpósio SIRGAS. Santo Domingo, República Dominicana. Nov, 2015. Disponível em:  
[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/2\\_Drewes\\_2015\\_Structure\\_objectives\\_IAG.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/2_Drewes_2015_Structure_objectives_IAG.pdf). Acesso em: 13 out 2016.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L.; BLITZKOW, D.; FREITAS, S. R. C. Scientific Foundations of the SIRGAS Vertical Reference System. In: DREWES, H. et al. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. Berlin: Springer, 2002. p. 297-301. x, 353 p. (IAG Symposia, v. 124). Disponível em: <[https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-04683-8\\_55.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-04683-8_55.pdf)>. Acesso em: 13 jul 2016.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2011.

ESA-EUROPEAN SPACE AGENCY. Introducing GOCE. **Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer**. Disponível em: <[https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GOCE/Introducing\\_GOCE](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Introducing_GOCE)>. Acesso em: 31 mai 2015.

FAZAN, J.A. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: estudo de caso na UHE de Itaipu**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.3.2010.tde-18112010-120841. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-18112010-120841/pt-br.php>. Acesso em: 13 mar 2018.

FEARNSIDE, P.M. Hidrelétricas na Amazônia brasileira: Questões ambientais e sociais. pp. 289-315 In: D. Floriani & A.E. Hevia (eds.) **América Latina Sociedade e Meio Ambiente: Teorias, Retóricas e Conflitos em Desenvolvimento**. Editora da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. 348 pp. 2016a. ISBN: 978-85-8480-027-8. Copyright: Editora da UFPR. Disponível em: <http://www.editora.ufpr.br/portal/livros/america-latina-sociedade-e-meio-ambiente/>. Acesso em: 29 dez 2017.

FEARNSIDE, P.M. Brazilian politics threaten environmental policies. **Science** 353: 746-748. doi: 10.1126/science.aag0254. 2016b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1126/science.aag0254>. Acesso em: 28 dez 2017.

FEARNSIDE, P.M. As barragens e as inundações no rio Madeira. **Ciência Hoje** 53(314): 56-57. 2014. Disponível em: <[http://philip.inpa.gov.br/publ\\_livres/2014/Enchente\\_Rio\\_Madeira\\_2014\\_Ciencia\\_Hoje.pdf](http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2014/Enchente_Rio_Madeira_2014_Ciencia_Hoje.pdf)>. Acesso em: 28 dez 2017.

FERREIRA, A.; CARNEIRO A.F.T. No PIGN, um olhar social sobre questões técnicas. **Revista Ponto de Referência**, nº3. p 8-11. IBGE, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: [ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/pmrg/revista\\_ponto\\_de\\_referencia3.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/pmrg/revista_ponto_de_referencia3.pdf)

FERREIRA, V.G.; FREITAS, S.R.C.; HECK, B. A separação entre o geoide e o quase geoide: uma análise no contexto brasileiro. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 63, Edição Especial 40 Anos, ISSN 0560-4613. Rio de Janeiro, 2011.

FORTES, L.P.S. **A Iniciativa da ONU para o Gerenciamento Global da Informação Geoespacial - GGIM**. Palestra apresentada no Seminário MundoGeo#Connect LatinAmerica 2012. São Paulo, 29 – 31 mai 2012.

FORTES, L.P.S.; AUGUSTO, M.J.C. **Tendências da Informação Geoespacial: uma visão dos próximos 5 a 10 anos (UN-GGIM)**. Seminário de Metodologia do IBGE. Rio de Janeiro, 03 dez 2015.

FREITAS, S.R.C. **Perspectivas de actividades de SIRGAS – GT III en vista del IHRS/IHRF**. Simpósio SIRGAS 2016. Instituto Geográfico Militar de Ecuador. Quito, 16-18 nov 2016. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/62\\_DeFreitas\\_2016\\_IHRS\\_IHRS\\_SIRGAS\\_GT\\_III.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/62_DeFreitas_2016_IHRS_IHRS_SIRGAS_GT_III.pdf)> Acesso em: 23 jan 2017.

FREITAS, S.R.C. **Atividades gravimétricas da UFPR** [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por Silvio Rogério Correia de Freitas, Professor Doutor do Curso de Pós Graduação em Ciências geodésicas, UFPR, <[sfreitas350@gmail.com](mailto:sfreitas350@gmail.com)>. Em 10 jun. 2015

FREITAS, S.R.C.; BLITZKOW, D. Altitudes e Geopotencial. **IGeS Bulletin N.9 – International Geoid Service**. Milan.p. 47 – 62, Jun 1999.

FREITAS, S.R.C.; LUZ, R.T.; FERREIRA, V.G. **Reflexões acerca da unificação dos Sistemas Verticais no âmbito do SIRGAS-GTIII**. Simpósio SIRGAS 2015. Santo Domingo, República Dominicana. 18-20 nov, 2015. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/27\\_DeFreitas\\_et\\_al\\_Unificacio\\_n\\_GTIII.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/27_DeFreitas_et_al_Unificacio_n_GTIII.pdf)> Acesso em 21jan2017.

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia física**. Curitiba,1999. 302f. Editora da Universidade Federal do Paraná.

GEO - **GROUP ON EARTH OBSERVATION**. Disponível em: <<https://www.earthobservations.org/index.php>>. Acesso em 14 out 2016.

GEOSS - GLOBAL EARTH OBSERVATION SYSTEM OF SYSTEMS. **The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) 10-Year Implementation Plan. 2005**. Disponível em:< [www.geoss.de/docs/10yr\\_Implementation\\_Plan.pdf](http://www.geoss.de/docs/10yr_Implementation_Plan.pdf)>. Acesso em 18 out 2016.

GEOFÍSICA BRASIL. **Banco Nacional de Dados Gravimétricos Terrestres**. Disponível em: <<http://geofisicabrasil.com/eventos/90-congresso/2252-banco-nacional-de-dados-gravimetricos-terrestres.html>>. Acesso em: 06 jun. 2015.

GFZ POTSDAM - DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM. **CHAMP - CHALLENGING Minisatellite Payload**. Disponível em: <<https://www.gfz-potsdam.de/champ/>>. Acesso em: 31 mai 2015.

GGRF. **GLOBAL GEODETIC REFERENCE FRAME**. 2016. Disponível em: <<http://ggim.un.org/knowledgebase/KnowledgebaseCategory37.aspx>>. Acesso em: 14 out 2016.

GILL, Y.; DAVID, C.H.; DEMIR, I.; ESSAWY, B. T.; FULWEILER, R. W.; GOODALL, J. L.; KARLSTROM, L.; LEE, H.; MILLS, H. J.; OH, J.; PIERCE, S. A.; POPE, A.; TZENG, M. W.; VILLAMIZAR, S. R.; YU, X. Toward the Geoscience Paper of the Future: Best practices for documenting and sharing research from data to software to provenance, **Earth and Space Science**, 3, 388–415, doi:10.1002/2015EA000136. Wiley Online Library. 2016. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015EA000136/full>>. Acesso em: 30 set 2017.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). **INTERNATIONAL DORIS SERVICE (IDS)**, 2016. Disponível em: <<http://176.28.21.212/en/about/services/ids/>>. Acesso em: 01 out 2016.

GODOY, R. A. Z.; PEREIRA, K. D., SANTOS, J. L. R. e OLIVEIRA, P. M. G. – **Translocação na Amazônia**. XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo, SP, 1991. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989/3126-translocacao-na-amazonia.html>>. Acesso em: 13 out 2016.

GOMES, R. A. A. D.; MOTTA, A. C. **Projeto Levantamento Gravimétrico no Estado da Bahia**. Relatório Final. 1980 Textos e Mapas. Salvador, CPRM. Convênio DNPM/CPRM, 140 p.

GRAHAM, S.; PARKINSON, C.; CHAHINE, M. **Weather Forecasting Through the Ages**. NASA fev, 2002. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/WxForecasting/wx2.php>>. Acesso em: 25 set 2017.

GULAL, E. Structural Deformations Analysis by Means of Kalman-Filtering. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 19(1), 98–113. Scielo, on-line version, ISSN 1982-2170, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1982-21702013000100007&script=sci\\_abstract&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1982-21702013000100007&script=sci_abstract&lng=pt)>. Acesso em: 02 out 2017.

GUIMARÃES G.N. **A altimetria e o modelo geoidal no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2010. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

GUIMARÃES, G. N. **A geoid model in the state of São Paulo: an attempt for the evaluation of different methodologies**. São Paulo, 2013. 144 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. ed. rev.

GUIMARÃES, G.N. **Oficina do geoide**. Coordenação de Geodésia do IBGE. Diretoria de Geociências. Rio de Janeiro, RJ. 24-28 abr 2017.

GUIMARÃES, G.N.; BLITZKOW, D. Problema de Valor de Contorno da Geodésia: Uma Abordagem Conceitual. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 17, no 4, p.607-624. Curitiba, 2011.

IAG. **INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY**. 2014. Disponível em: <<http://www.iag-aig.org/>>. Acesso em: 25 set 2014.

IAG - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. **IAG Resolution (No. 1) for the establishment of a global absolute gravity reference system**.2015a. Disponível em: <[https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf)>. Acesso em: 03 out 2016.

IAG - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. **IAG Resolution (No. 2) for the establishment of a global absolute gravity reference system**.2015b. Disponível em: <[https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf)>. Acesso em: 03 out 2016.

IAG. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. **Global Geodetic Observing System (GGOS)**. 2106a. Disponível em: <<http://www.ggosdays.com/en/about/ggos-infos/>>. Acesso em: 01 out 2016.

IAG. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. **Description of the Global Geodetic Reference Frame (GGRF)**. Position paper adopted by the IAG Executive Committee. 2016b. Disponível em: <[http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF\\_description\\_by\\_the\\_IAG\\_V2.pdf](http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF_description_by_the_IAG_V2.pdf)>. Acesso em: 23 jan 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf)>. Acesso em: 03 jan 2018.

ICSU. **International Council for Science**. Disponível em <http://www.icsu.org/about-icsu/about-us>. Acesso em 23 set 2016.

IHDE, J.; SÁNCHEZ, L.; BARZAGHI, R.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; MARTI, U.; PAIL, R.; SIDERIS, M. (2017). Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRs). **Surveys in Geophysics**, v. 38, n. 3. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-017-9409-3>>. Acesso em: 13 nov 2017.

IPGH, SIRGAS, CP-IDEA, GeoSUR, **Plano de Ação Conjunto 2013-2015 para acelerar o desenvolvimento da Infraestrutura de Dados Espaciais das Américas**. IPGH, México, D.F., 2013. Disponível em: <<http://www.ipgh.org/Iniciativas/PlanodeAcao.pdf>>. Acesso em: 11 dez 2016.

IUGG. **International Union of Geodesy and Geophysics**. Disponível em <<http://www.iugg.org>>. Acesso em: 24 set 2016.

JOHNSON, B. NOAA Project to Measure Gravity Aims to Improve Coastal Monitoring. **Science**, 325(5939), 378 LP-378. 2009. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/content/325/5939/378/tab-pdf>>. Acesso em: 30 set 2017.

LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E.Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BAKER, V.R.; D'HORTA, F.M.; WIGHT, C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; BAKER, P.A.; RIBAS, C.C.; NORGAARD, R.B.; FILIZOLA, N.; ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; STEVAUX, J.C. Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature** 546, 363–369, 15 June 2017. doi:10.1038/nature22333. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature22333?sf88395732=1>>. Acesso em: 13 out 2017.

LI, B. L.; RODELL, M.; ZAITCHIK, B. F.; REICHLE, R. H.; KOSTER, R. D. & VAN DAM, T. M. Assimilation of GRACE terrestrial water storage into a land surface model: Evaluation and potential value for drought monitoring in western and central Europe. **Journal of Hydrology**, 446, 103–115. 2012. <http://doi.org/Doi10.1016/J.jhydrol.2012.04.035>. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1066&context=nasapub>>. Acesso em: 02 out 2017.

LOBIANCO, M. C. B. **Determinação das alturas do geóide no Brasil**. São Paulo, 2005. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21022006-162205/>>. Acesso em: 26 abr. 2015.

LUNARDI, O.A.; ISSMAEL, L.S. Técnicas de modelagem de dados utilizadas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército, visando à interoperabilidade de infraestruturas de dados espaciais. **Bahia Análise & Dados**, v.25, n.4, p.727-738, out / dez 2015. Publicada pela Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Salvador, 2016. ISSN 0103 8117.

LUZ, R.T. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. Curitiba, 2008. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

LUZ, R.T. **Modernização da componente vertical do SGB**. 3ª Conferência Nacional de Produtores e Usuários de Informações Estatísticas, Geográficas e Ambientais (INFOPLAN). Rio de Janeiro, RJ. 5 a 9 dez 2016.

MACAULEY, M.K. Is the vision of the Earth Observation Summit realizable? **Space Policy**, n. 21, p. 29-39. Elsevier ([www.elsevier.com/locate/spacepol](http://www.elsevier.com/locate/spacepol)). 2005. Disponível em: <<https://docslide.us/download/link/is-the-vision-of-the-earth-observation-summit-realizable>> Acesso em: 14 out 2016.

MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P. **Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão**. In: Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. Mecanização e agricultura de precisão. Lavras: UFLA/SBEA. p. 109-157,1998. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/480806/maquinas-e-operacoes-utilizadas-na-agricultura-de-precisao>>. Acesso em: 22 jul 2017.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agricultura de precisão**. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Boletim Técnico 2013. Brasília :Mapa/ACS, 2013.36 p.ISBN 978-85-99851-90-6. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/boletim-tecnico-agricultura-de-precisao-2013.pdf>>. Acesso em: 22 jul 2017.

MATOS, A. C. O. C. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de Geodésia e Geofísica na América do Sul**. 2005. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10102005-104155>>. Acesso em: 21 maio 2015.

MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. **Modelagem Digital de Terrenos (MDT) de 3" para a América do Sul**. Projeto de Pós-Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.  
MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Agenda 21 Global**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>. Acesso em 26jun2017.

MELLO, M.P. **O Sistema Geodésico Brasileiro**. Relatório Técnico da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 1981. Disponível em <<http://artigos.ibge.gov.br/images/pdf/artigos/1981osistemageodesicobrasileiro.pdf>>. Acesso em 25 ago 2016.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. 302 p. ISBN 85-7738-047-5. Brasília, 2006. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_pnla/\\_arquivos/sqa\\_3.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/sqa_3.pdf)>. Acesso em: 22 dez 2017.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo. Editora UNESP. 2008.

MONTECINO, H.C.; STAUB, G.; VAGNER G. FERREIRA, W.G.; PARRA, L.B. Monitoring groundwater storage in northern Chile based on satellite observations and data simulation. **Boletim de Ciências Geodésicas** - On-Line version, ISSN 1982-2170  
<http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000100001>. Curitiba, v. 22, no1, p.01-15, jan-mar, 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bcg/v22n1/1982-2170-bcg-22-01-00001.pdf>>. Acesso em: 02 out 2017.

MRE. MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>>. Acesso em: 15 dez 2017.

NASA-NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. International Laser Ranging Service. Space Geodesy Program. **Satellite laser ranging and earth science**. 2015. Disponível em: <[ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/slrover.pdf](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/slrover.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2015

NASA-NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Gravity Recovery and Climate Experiment - GRACE**. Disponível em: <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/Grace/](https://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/)>. Acesso em: 31 maio 2015

NICACIO JUNIOR, E.L. **Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira**. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 228 f. : il. color. ; 30 cm. Curitiba, 2017.

NOAA. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **The National Geodetic Survey. Ten-Year Strategic Plan, 2013-2023: Positioning America for the Future**. 2017. Disponível em: <https://www.ngs.noaa.gov/INFO/tenyearfinal.shtml>. Acesso em: 17 dez 2017.

NRC. National Research Council. **Precise Geodetic Infrastructure: National Requirements for a Shared Resource**. Washington, DC: The National Academies Press. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/12954>. <https://www.nap.edu/download/12954>. Acesso em: 26 dez 2017.

NUNES, M.A. **Palestra**. Rio de Janeiro: IBGE, CDDI, 2015. Palestra proferida por ocasião do Encontro de Gerências Regionais de Geodésia e Cartografia - Modelo Geoidal 2015. Em jun. 2015.

OBSERVATÓRIO NACIONAL ON. **Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, 1976-1986**. Departamento de Geofísica. Rio de Janeiro: ON, 1986. Disponível em: <<http://www.on.br/>>. Acesso em: 14 maio 2015.

ONU- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - **Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods7/>>. Acesso em: 25 mar 2017.

PEREIRA, K. D.; OLIVEIRA, L.C., **Integração das Redes de Monitoramento Contínuo: Uma necessidade?**. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte, MG, 2003. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2004-2000/8088-integracao-das-redes-de-monitoramento-continuo-uma-necessidade>>. Acesso em: 15 out 2016.

PEREIRA, R.A.D. **Conexão das redes verticais fundamentais do Brasil e da Argentina com base em números geopotenciais**. Curitiba, 2009. 160 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

PILAPANTA, C.A.; KRUEGER, C.; TIERRA, A. **Análisis y evaluación de variables atmosféricas obtenidas a través de posicionamiento GNSS y técnicas meteorológicas convencionales**. Simposio SIRGAS2016. Quito, Ecuador. 16 – 18 nov, 2016. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/21\\_Pilapanta\\_et\\_al\\_2016\\_AtmosferaGNSSyMetereologiaa.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/21_Pilapanta_et_al_2016_AtmosferaGNSSyMetereologiaa.pdf)>. Acesso em: 28 mai 2017.

PINTO, L. G. R. **Atividades gravimétricas da CPRM** [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por Luiz Gustavo Rodrigues Pinto, Chefe da Divisão de Geofísica – DIGEOF, CPRM - Serviço Geológico do Brasil <[luiz.pinto@cprm.gov.br](mailto:luiz.pinto@cprm.gov.br)>. Em 22 jun. 2015.

PLAG, H.P; PEARLMAM, M. **Global Geodetic Observing System - Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020**. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 9783642026874, 9783642026867. DOI10.1007/978-3-642-02687-4

PNUD - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO NO BRASIL. **Os 8 Objetivos do Milênio (ODM)**. Disponível em: <<http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/post-2015/sdg-overview1/mdg7/>>. Acesso em: 26 jun 2017.

RAJABIFARD, A.; BINNS, A.; MASSER, I. & WILLIAMSON, I. The role of sub-national government and the private sector in future spatial data infrastructures. **International Journal of Geographical Information Science**: 20 (7): p. 727–741, 2006. Disponível em: <[https://minerva-access.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11343/34922/67697\\_00004129\\_01\\_IJGIS\\_Paper\\_-\\_Reviewed\\_131005.pdf?sequence=1](https://minerva-access.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11343/34922/67697_00004129_01_IJGIS_Paper_-_Reviewed_131005.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 17 jul 2017.

RANGELOVA, E., SIDERIS, M. G., & FOTOPOULOS, G. A dynamic reference surface for heights in Canada. **Geomatica**, vol 63, nº4, 333–340, 2009. Disponível em: <[https://www.cig-acsg.ca/Resources/Geomatica/geomatica\\_files/geomatica\\_sample/63-4/63-4\\_P333-340.pdf](https://www.cig-acsg.ca/Resources/Geomatica/geomatica_files/geomatica_sample/63-4/63-4_P333-340.pdf)>. Acesso em: 30 set 2017.

RIBAMAR, J.L.B. **Atividades gravimétricas da ANP**. [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por José Ribamar Lopes Bezerra, Coordenador do BDEP / BNDG, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, <[jbezerra@anp.gov.br](mailto:jbezerra@anp.gov.br)>. Em 18 ago.2015.

RIBEIRO, F.C.D. **Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para monitoramento geodésico de barragens - estudo de caso**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/D.3.2008.tde-10112009-102642. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10112009-102642/pt-br.php>>. Acesso em: 15 mar 2018.

RODRIGUEZ, L.S. **Determinación de la superficie vertical de referência para Colombia**. Technische Universität Dresden. Dresde, jun2003. Disponível em: <<http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/d24c2900469f78a2b006b8923ecdf8fe/mo delo+geoidal+GEOCOL+2004.pdf?MOD=AJPERES>> Acesso em: 31 mai 2016.

RODRIGUEZ, L.V. **O Datum Geodésico de Chuá**. VIII Congresso Brasileiro de Cartografia. Fortaleza, 24 a 31 de julho de 1977.

RUEGG, J. C.; CAMPOS, J.; MADARIAGA, R.; KAUSEL, E.; CHABALIER, J. B.; ARMIJO, R.; DIMITROV, D.; GEORGIEV, I.; BARRIENTOS, S. Interseismic strain accumulation in south central Chile from GPS measurements, 1996–1999. **Geophysical Research Letters**, vol 29, nº11, 10.1029/2001GL013438. Jun 2002. Disponível em: <<http://www.geologie.ens.fr/~madariag/Papers/Ruegg.pdf>>. Acesso em: 01 out 2017.

SÁ, N.C. **Elementos de Geodésia**. Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Geofísica. São Paulo, 2001.

SAE. SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **Recursos Hídricos Fronteiriços e Transfronteiriços do Brasil**. Série Estudos Estratégicos - Água e Desenvolvimento Sustentável. Brasília, mai 2013. Disponível em: <[http://estatico.cnpq.br/portal/premios/2013/pjc/imagens/noticias/publicacao\\_agua\\_sae.pdf](http://estatico.cnpq.br/portal/premios/2013/pjc/imagens/noticias/publicacao_agua_sae.pdf)>. Acesso em: 05 dez 2017.

SANCHEZ, L.S. **Advances in the implementation of the International Height Reference System (IHR)**. Simpósio SIRGAS 2017. Nov. 27 -20, 2017. Mendoza, Argentina. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/18\\_Sanchez\\_2017\\_IHR\\_Advances.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/18_Sanchez_2017_IHR_Advances.pdf)>. Acesso em: 15 fev 2018.

SANCHEZ, L.S.; IHDE, J.; PAIL, R.; BARZAGHI, R.; MARTI, U.; ÅGREN, J.; SIDERIS, M.; NOVÁK, P. **Strategy for the Realization of the International Height Reference System (IHR)**. Simpósio SIRGAS 2016. Instituto Geográfico Militar de Ecuador. Quito, 16-18 nov 2016. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/46\\_Sanchez\\_et\\_al\\_2016\\_IHR\\_S\\_Realization.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol21/46_Sanchez_et_al_2016_IHR_S_Realization.pdf)>. Acesso em: 23 jan 2016.

SÁNCHEZ, L.; IHDE, J.; BARZAGHI, R.; DREWES, H.; FÖRSTEN C.H.; LIEBSCH, G.; MARTI, U.; SIDERIS, M. **Establishment of an International Height Reference System in the frame of GGOS**. Simposio SIRGAS2015. Santo Domingo, República Dominicana. Nov 2015. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/26\\_Sanchez\\_et\\_al\\_2015\\_IHR\\_S.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/26_Sanchez_et_al_2015_IHR_S.pdf)>. Acesso em: 09 mai 2016.

SANT'ANNA, F.M. **Governança global dos recursos hídricos transfronteiriços: o papel da cooperação internacional e da cooperação transfronteiriça**. In: 3º ENCONTRO NACIONAL ABRI 2011. São Paulo, 2011. Proceedings online... Associação Brasileira de Relações Internacionais, Instituto de Relações Internacionais – USP. Disponível em:

<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000122011000200009&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000122011000200009&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 09 jul. 2017.

SANTOS, M. C. Benefícios da Utilização do SIRGAS2000. **Revista Ponto de Referência, nº2**. p 9-11. IBGE, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/pmrg/revista\\_ponto\\_de\\_referencia2.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/pmrg/revista_ponto_de_referencia2.pdf)>. Acesso em: 31 mai 2017

SANTOS, M. C. SIRGAS2000: O Referencial Geocêntrico do Brasil. **Revista Ponto de Referência, nº1**. p 5-6. IBGE, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/pmrg/revista\\_ponto\\_de\\_referencia.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/pmrg/revista_ponto_de_referencia.pdf)>. Acesso em: 30 mai 2017.

SAPUCCI, L.F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia**. Tese de Doutorado. - UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, SP, 2005. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100933/sapucci\\_lf\\_dr\\_prud.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100933/sapucci_lf_dr_prud.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 27 set 2017.

SAPUCCI, L.F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Dissertação (mestrado). - UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, SP, 2001. Disponível em: <[http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d\\_sapucci\\_lf.pdf](http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_sapucci_lf.pdf)>. Acesso em: 21 set 2017.

SEVERO, T.C. **Estudos das Altitudes Físicas Aplicado à Rede Altimétrica Fundamental do Brasil no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2013. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, D.H. O Sistema Global dos Sistemas de Observação da Terra (GEOSS): estratégias de implementação a serem definidas. **Revista Parcerias Estratégicas**, Vol. 11, No 23, folhas 289 a 310. 2006. Disponível em: <[http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias\\_estrategicas/article/view/298](http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/298)>. Acesso em: 25 mar 2017.

SILVA, A.L; LIMA, M.A.A; COSTA, S. M. A. **Redes Estaduais GPS: Situação Atual e Perspectiva Futura**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, 2008. **Redes Estaduais GPS: situação atual e perspectiva futura**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 8-11 de setembro de 2008. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/267685041\\_REDES\\_ESTADUAIS\\_GPS\\_SITUACAO\\_ATUAL\\_E\\_PERSPECTIVA\\_FUTURA](https://www.researchgate.net/publication/267685041_REDES_ESTADUAIS_GPS_SITUACAO_ATUAL_E_PERSPECTIVA_FUTURA)>. Acesso em: 14 out 2016.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÊNTRICO PARA LAS AMÉRICAS. SIRGAS. Reporte 2015, **Boletín Informativo Nro 20**. Diciembre de 2015. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/Boletin\\_SIRGAS\\_20.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/Boletin_SIRGAS_20.pdf)>. Acesso em: 24 ago 2016.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS. SIRGAS. **Boletín Informativo Nro 8**. Febrero de 2005. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/bol\\_008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/bol_008.pdf)>. Acesso em: 09 maio 2015.

SOUSA, M.A. **Atividades gravimétricas do ON**. [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por Mauro Andrade de Sousa, Coordenação de Geofísica, Observatório Nacional. <mauro@on.br>. Em 30 maio 2015.

SCHWINTZER, P.; REIGBER, C. The contribution of GPS flight receivers to global gravity field recovery. **Journal of Global Positioning Systems**, v.1, n.1, 2002. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=206>>. Acesso em: 20 jun 2015.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J.P. A. R. **Precision farming: characteristics of its adoption in the southwest region of Goiás–Brazil**. Engenharia Agrícola, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/289993765\\_Precision\\_farming\\_characteristics\\_of\\_its\\_adoption\\_in\\_the\\_southwest\\_region\\_of\\_Goias\\_-\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/289993765_Precision_farming_characteristics_of_its_adoption_in_the_southwest_region_of_Goias_-_Brazil)>. Acesso em: 23 jul 2017.

STENNER, C. **Princípios da Gestão da Geoinformação (GGIM – Global Geospatial Information Management - UN-GGIM)**. Seminário de Metodologia do IBGE. Rio de Janeiro, 03 de dezembro de 2015. Disponível em: <[http://eventos.ibge.gov.br/images/smi2015/apresentacoes/C7-seminarioSMI\\_GGIMClaudioStenerSMI2015.pdf](http://eventos.ibge.gov.br/images/smi2015/apresentacoes/C7-seminarioSMI_GGIMClaudioStenerSMI2015.pdf)>

TAPLEY, B.D.; BETTADPUR, S.; RIES, J.C.; THOMPSON, P.F.; WATKINS, M.M. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. **Science**, vol. 305, issue 5683, pp. 503-505. 23 Jul 2004. DOI: 10.1126/science.1099192. Disponível em: <[https://geodesy.geology.ohio-state.edu/course/refpapers/Tapley\\_Science\\_Grace\\_2004.pdf](https://geodesy.geology.ohio-state.edu/course/refpapers/Tapley_Science_Grace_2004.pdf)>. Acesso em: 03 dez 2017.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. xv, 416 p.

UN GGIM-UNITED NATIONS COMMITTEE OF EXPERTS ON GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT. 2017. Disponível em: <<http://ggim.un.org/>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

VANICEK, P. & KRAKIWSKY, E.-1986- **Geodesy: The concepts**. Elsevier, N York, 697pp

VANIČEK, P.; SANTOS, M. S.; TENZER, R.; NAVARRO, A. H. Algunos aspectos sobre alturas ortométricas y normales. **Revista Cartográfica**, n.76/77, p. 79-86, dez 2003.

VARGAS, R.B.; DÍAZ, W.M.; ALCÁNTAR, R.O.; MUTIS, S.B. **Plan de Acción Conjunto 2016-2020 para acelerar el desarrollo de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas**. IPGH, México, D.F., 2016. Disponível em: <<https://www.ipgh.org/planificacion/default.html>>. Acesso em: 13 mar 2017.

WILMES, H.; WZIONTEK, H.; FALK, R.; IHDE, J.; BONVALOT, S.; FORSBERG, R.; KENYON, S.; VITUSHKIN, L. **Establishment of a Global Absolute Gravity Network**. IAG SYMPOSIUM on TERRESTRIAL GRAVIMETRY: STATIC and MOBILE MEASUREMENTS (TG-SMM2010), 22 - 25 June 2010. Russia, Saint PetersburgTG-SMM-2010 –St. Petersburg, Russia, 2010. Disponível em: <[http://www.eas.slu.edu/GGP/Wilmes\\_World\\_AG\\_Network.pdf](http://www.eas.slu.edu/GGP/Wilmes_World_AG_Network.pdf)>. Acesso em: 30 nov 2017.

WMO-WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Implications of Using the World Geodetic System 1984 (WGS84)**. Commission for basic systems open programme area group on integrated observing systems. Expert team on satellite systems, sixth session. Geneva, Switzerland, 12-15 abr 2011. Disponível em: <[https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/ET-SAT-6\\_Doc\\_16-01\\_WGS84.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/sat/meetings/documents/ET-SAT-6_Doc_16-01_WGS84.pdf)>. Acesso em: 25 set 2017.

## **APÊNDICE 1**

### **EVOLUÇÃO DA INFRAESTRUTURA GRAVIMÉTRICA NO BRASIL**

# EVOLUÇÃO DA INFRAESTRUTURA GRAVIMÉTRICA NO BRASIL

## EVOLUTION OF GRAVIMETRIC INFRASTRUCTURE IN BRAZIL

Carlos Alberto Correa e **CASTRO JUNIOR**<sup>1</sup>, Gabriel do Nascimento **GUIMARÃES**<sup>2</sup>, Nilson Clementino **FERREIRA**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Avenida Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74690-900, Goiânia – GO. Endereço eletrônico: correaecastrojr@gmail.com, nclferreira@gmail.com

<sup>2</sup>Laboratório de Topografia e Geodesia, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, Rodovia LMG 746 km 1 s/n, CEP: 38500-000, Monte Carmelo – MG. Endereço eletrônico: gabriel@ufu.br

**RESUMO** - Com o avanço das técnicas de medição da aceleração de gravidade, houve considerável aumento das aplicações gravimétricas em diversos segmentos de atividades mundo afora. Por conseguinte, uma profusão de dados gravimétricos espaciais, aéreos, marinhos e terrestres tem sido adquirida, sobretudo desde meados do século passado. Ao desafio de aprimorar as aplicações, soma-se o interesse da comunidade científica em estabelecer padrões acerca da aquisição e manutenção do acervo auferido, visando dar maior homogeneidade às informações obtidas e disponibilizadas ao usuário. No quadro brasileiro, a falta de uma política gravimétrica nacional tem acarretado iniciativas difusas, fazendo com que cada instituição preencha suas necessidades de forma independente e sem a devida padronização. O presente artigo visa trazer à tona informações que possibilitem um melhor conhecimento das atividades gravimétricas até então empreendidas em território brasileiro, retratando as principais técnicas e instrumentos utilizados. Adicionalmente, retrata-se brevemente a trajetória das principais instituições que atuam no campo da gravimetria, no intuito de conhecer o passado, compreender o presente e antever futuras ações devidamente concatenadas.

**Palavras-chave:** Gravimetria. Gravímetro. Aceleração de Gravidade.

**ABSTRACT** - With the advancement of gravity acceleration measurement techniques, there has been considerable increase of gravimetric applications in various segments of activities around the world. Therefore, a profusion of spatial gravity data, aerial, marine and land has been acquired, especially since the middle of last century. The challenge of improving the application adds to the interest of the scientific community to establish standards on the acquisition and maintenance of earned assets, to ensure greater homogeneity of the information obtained and made available to users. In the Brazilian context, the lack of a gravimetric national policy has led to diffuse initiatives, leading each institution to meet their needs independently and without proper standardization. This article aims to bring to light information that allows a better understanding of gravimetric activities hitherto undertaken in Brazil, portraying the main techniques and instruments used. Additionally, is portrayed briefly the trajectory of the main institutions working in the field of gravity in order to know the past, understand the present and anticipate future actions properly concatenated.

**Keywords:** Gravimetry. Gravity meter. Gravity acceleration.

## INTRODUÇÃO

A gravidade é onipresente, incidindo sobre todos os seres vivos e em qualquer lugar do mundo. Seus efeitos produzem alguma influência nos mais variados segmentos das atividades cotidianas. Inúmeros estudos envolvendo a aceleração de gravidade têm sido conduzidos através dos tempos, trazendo à tona uma infinidade de aplicações que, em última análise, podem ajudar à humanidade a interagir melhor com o planeta Terra.

A partir de meados do século XX houve um avanço considerável nas técnicas voltadas à determinação de gravidade, melhorando

gradativamente a precisão dos resultados auferidos e acarretando numa profusão de levantamentos gravimétricos espaciais, aerotransportados, marinhos e, principalmente, terrestres. Por conseguinte, a cada dia que passa surgem novos empregos para aceleração de gravidade, ampliando os horizontes de diversas ciências, com destaque às atividades ambientais, arqueológicas, cartográficas, de engenharia, geodésicas, geofísicas, mineralógicas e petrolíferas.

No Brasil, a falta de uma política gravimétrica nacional tem gerado alguns

inconvenientes correlacionados à duplicidade de esforços e à designação de diretrizes concatenadas. Em decorrência, a comunidade usuária não tem uma visão clara do que existe disponível em termos de acervos gravimétricos e ainda se ressentir de mecanismos mais eficazes de utilização de todos esses dados.

Indo ao encontro dessas circunstâncias, o presente artigo pretende discorrer sobre a evolução da gravimetria no Brasil, enfocando aspectos pregressos, atuais e futuros das principais instituições, técnicas e equipamentos envolvidos com a produção gravimétrica em terras brasileiras. Destaca-se que não existe um documento que retrate essas informações, razão pela qual, pretende-se preencher, ao menos parcialmente, as lacunas até então existentes.

Inicialmente, são apresentadas generalidades sobre a medição de gravidade,

### **MEDIÇÃO DA ACELERAÇÃO DE GRAVIDADE**

A força de gravidade é um fenômeno universal e, em nosso planeta, ocorre basicamente devido à atração das massas terrestres e da força centrífuga advinda da rotação da Terra (Dehlinger, 1978). Depreende-se então que o campo de gravidade manifesta-se no interior da crosta, nos oceanos e massas d'água, na superfície e nas camadas de ar circundantes.

A força de gravidade sempre despertou considerável interesse da humanidade, sendo tratada por grandes pensadores, tais como o filósofo grego Aristóteles (384 - 322 a.C), o primeiro a descrever fenômenos práticos correlacionados com a aceleração de gravidade “*g*”, Galileu Galilei, Leonardo da Vinci e Isaac Newton. É sempre oportuno mencionar que o planeta Terra assumiu sua forma atual sob a ação da força de gravidade (Torge, 2001).

Galilei introduziu dois métodos de medidas absolutas: pendular e “queda-livre” (*free-fall*). O método pendular foi utilizado para realizar a primeira medição da aceleração de gravidade no observatório de Potsdam, Alemanha, em 1906. A expressão do movimento do pêndulo é a seguinte:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1)$$

com as principais áreas de aplicação. Em seguida, as modalidades de determinação gravimétrica são delineadas, indicando características, mecanismos e principais equipamentos usados no Brasil e no mundo. Em seguida, são tratadas as instituições brasileiras que mais se destacam no contexto gravimétrico nacional. Concluindo, algumas perspectivas futuras são apontadas.

Ante a natureza informativa do artigo, tratando de informações tanto minuciosas quanto abrangentes, buscou-se maior ênfase às conotações geodésicas que o tema propicia. Adicionalmente, destacam-se as dificuldades encontradas nas tentativas de recuperação de informações institucionais pregressas, pela falta de documentação afim ou mesmo de profissionais ainda atuantes que conheçam com detalhes o que ocorreu no passado.

onde *T* é o período, *l* o comprimento e *g* a aceleração de gravidade. A partir do comprimento do pêndulo e de uma série de observações do período do movimento durante certo intervalo de tempo, obtém-se o valor de “*g*” por meio de um método de ajustamento de observações (e.g. Gemaél, 1999; Torge, 2001).

O valor de “*g*” na superfície terrestre varia proporcionalmente à distância ao centro da Terra. Em tese, um corpo situado na linha do equador sofre menos influência da gravidade do que nos polos. Isso implica em dizer que a latitude e altitude são grandes responsáveis pela variação de “*g*”. Entretanto, as diferenças de densidades em massas existentes no interior e exterior da crosta terrestre também interferem nessas magnitudes.

Motivados por razões científicas e econômicas, vários segmentos da sociedade se ocupam do estudo do campo de gravidade e da consequente determinação de “*g*”. A empresa norte-americana Micro-g LaCoste (<http://microglacoste.com/>), provavelmente a maior fabricante mundial de equipamentos gravimétricos, destaca algumas aplicações por áreas de estudo:

- Monitoramento Ambiental: monitoramento do lençol freático em aquíferos; gestão dos resíduos nucleares e análises do nível global do mar.

- Gestão de Recursos Minerais: exploração de petróleo e prospecção mineral.
- Geofísica: detecção de movimentos crustais; monitoramento de magma vulcânico; estudos de subducção de placas e investigação de terremotos.
- Calibrações de Precisão: padronização do quilograma no sistema internacional; transdutor de pressão e célula de carga de calibração.
- Geodesia: determinação do geoide; construções de redes gravimétricas; elaboração de modelos geoidais e do geopotencial.

Em paralelo, outras aplicações promissoras e não menos importantes concernentes à engenharia, geotectônica, hidrologia e arqueologia ampliam cada vez mais o uso das medições de gravidade.

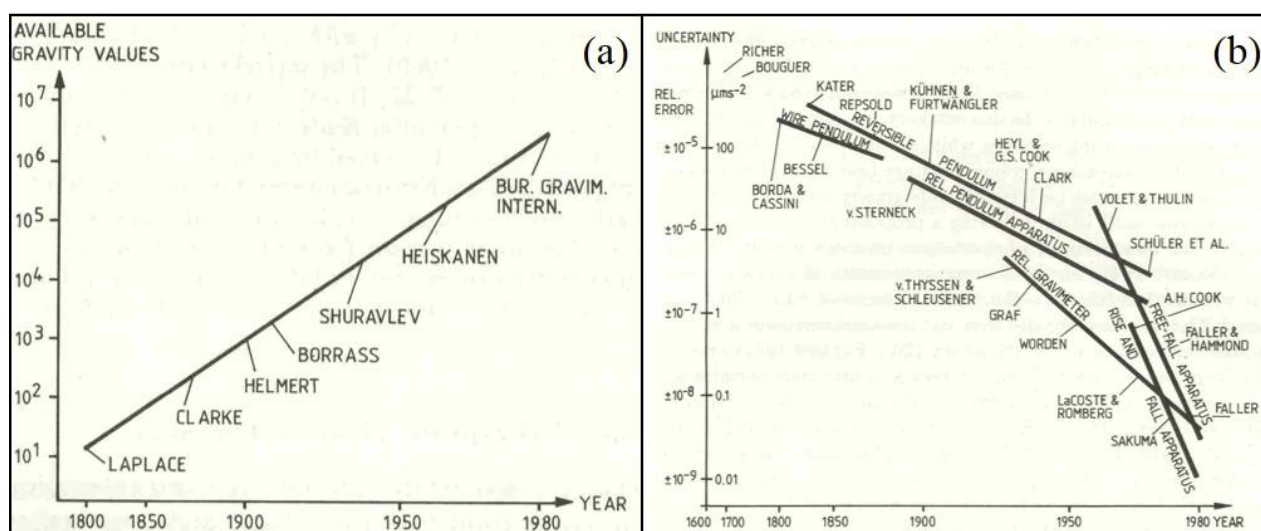
A ciência que se incumbe precipuamente do estudo e determinação da gravidade é denominada Gravimetria. Etimologicamente gravimetria significa medida de um peso. Pode ser definida como sendo o conjunto de técnicas e procedimentos voltados ao estudo da aceleração de gravidade (Castro Junior, 2005). Por sua vez, Coyago (2010), define como a ciência que estuda as variações do campo de gravidade. Uma maneira usual de se abordar a questão da medição de “ $g$ ” pressupõe métodos gravimétricos terrestres, aéreos, marinhos e satelitais. Pretende-se discorrer sobre cada uma dessas modalidades, com justificada ênfase à componente terrestre, apresentando as principais características e instrumentos empregados no território nacional, bem como apresentar os trabalhos e resultados atuais relacionados à gravimetria.

## GRAVIMETRIA TERRESTRE

As primeiras medições terrestres acuradas de “ $g$ ” foram efetuadas com dispositivos pendulares. Embora o primeiro relógio

pendular tenha sido construído em 1657 por Christian Huygens, foi somente em 1672 que o astrônomo francês Richer, obteve um valor absoluto de gravidade através da oscilação de um pêndulo, na Guiana Francesa (Dehlinger, 1978; Coyago, 2010). De acordo com Thomas (1966), tais medições ajudaram a embasar as teorias iniciais de que a Terra seria achatada nos polos. Em terras brasileiras, atribui-se ao geógrafo francês Pierre Couplet a primeira determinação gravimétrica na Paraíba, no ano de 1698, utilizando também um dispositivo pendular; essas medições foram mencionadas por Newton, defensor da premissa do achatamento polar, no volume III dos seus *Philosophiae naturalis principia mathematica*, na edição de 1713 (Moreira, 1991).

Com o passar dos anos, várias maneiras de se medir “ $g$ ” foram sendo criadas e aperfeiçoadas, culminando com a produção em série de instrumentos específicos para aquele fim, denominados gravímetros. Até aproximadamente 1920, tais medições eram conduzidas com instrumentos pendulares e balanças de torção que, além de demoradas, restringiam-se a regiões de fácil acesso (Torge, 1989). Na terceira década do século passado surgem os primeiros gravímetros mecânicos que permitiram uma verdadeira revolução na medição de gravidade e disponibilizavam resultados dez vezes superiores aos dispositivos pendulares (Gemael, 1999). A partir de então uma profusão de estações gravimétricas foram determinadas em vários recantos do mundo, inclusive no Brasil. A Figura 1 (a) ilustra a quantidade de medidas gravimétricas registradas do início de 1800 a meados da década de 1980, enquanto que a Figura 1 (b) apresenta a precisão dessas medidas, correlacionando com o tipo e marca dos principais equipamentos.



**Figura 1** - Dados gravimétricos disponíveis de 1800 a 1980 (a) e incertezas das medidas para o mesmo período (b) (Torge, 1989).

O alvorecer deste século XXI testemunhou consideráveis avanços nessas determinações e, a cada dia que passa, vislumbram-se novas aplicações em variados ramos da atividade humana. Normalmente as estações gravimétricas distribuídas na superfície da Terra estão organizadas em redes. No Brasil existem diversas concepções para as redes gravimétricas. Entretanto, independentemente da nomenclatura utilizada, há um consenso de que há duas grandes modalidades de redes gravimétricas no contexto terrestre: redes absolutas e redes relativas<sup>9</sup>.

### Determinação Absoluta da Gravidade Terrestre

Nesta modalidade o valor de “g” é obtido diretamente do instrumental empregado. Há duas formas clássicas para se determinar a gravidade absoluta: utilizando dispositivos pendulares, já em desuso, e por meio da queda livre de um corpo. Conforme Gemael (1999), a partir do momento em que foi possível a medição acurada de intervalos infinitesimais de tempo e distância de um corpo em queda livre, a modalidade de determinação absoluta que empregava a queda de um corpo, ganhou notoriedade; isso ocorre até os dias atuais.

No panorama geodésico mundial, o conjunto de estações gravimétricas absolutas compõe a Rede de Referência de Gravidade Absoluta e representa o que de mais preciso existe em termos de referencial, cujos dados

estão disponíveis no *International Gravimetric Bureau* (BGI), (<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases>). No Brasil tal rede de referência é traduzida pela REde Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas (RENEGA); esses dados podem ser obtidos em (<http://www.cenegeo.com.br/rede-grav-absoluta>). Com vistas aos objetivos deste artigo, torna-se conveniente apenas uma abordagem sumária dos equipamentos absolutos existentes em território brasileiro.

### Gravímetros FG-5 e A-10

Produzido pela Micro-g LaCoste desde 1995, o FG5 (Figura 2a) passou a ser o equipamento mais acurado para as medições absolutas de “g” disponível no Brasil. O princípio de funcionamento considera um corpo em queda livre numa câmara de vácuo de 0,33 m de comprimento. A posição deste corpo durante a queda é traduzida em franjas óticas e monitorada com grande precisão por um processo interferométrico a laser e por um relógio atômico de rubídio. Em 2004 o Observatório Nacional (ON) adquiriu este único exemplar que foi instalado no Laboratório de Gravimetria existente na cidade de Vassouras, estado do Rio de Janeiro.

Outro equipamento presente no território brasileiro é o gravímetro A-10. O método de operação do A-10 é semelhante ao empregado pelo FG5 e considera também um corpo em queda livre numa câmara de vácuo com um

<sup>9</sup> Detalhamento sobre os tipos de redes gravimétricas existentes e propostas, podem ser obtidos em Mello

(1973); Rosier (1979); Trabanco (1995); Gemael (1999); Santos Junior (2005); Castro Junior (2005) e Luz (2008).

preciso controle interferométrico de posição, utilizando um feixe de laser e um relógio atômico. Uma das principais características desse gravímetro diz respeito à portabilidade, permitindo deslocar o equipamento em viaturas convenientemente preparadas. Embora o fabricante, a empresa Micro-g LaCoste, informe que o A-10 tenha sido projetado para operar mesmo em condições severas, medições recentes efetuadas pelos autores com o equipamento de número 32, denotam que, na prática, as condições de estabilidade das estações, aliadas aos fatores climáticos, interferem na qualidade das observações. Em decorrência, estações com bases estáveis e abrigadas do sol, chuvas e ventos devem ser preferidas para que se possam obter resultados mais apropriados. Paralelamente, os inúmeros componentes

mecânicos e eletrônicos são bastante sensíveis e requerem ajustes amíúde. Por conseguinte, no manuseio e deslocamentos com o equipamento, as atenções e cuidados devem ser redobrados e eventuais manutenções preventivas e corretivas devem fazer parte de sua rotina operacional. Há duas unidades desse equipamento no Brasil, uma pertence ao ON e a segunda, adquirida pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), é operada pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). A Figura 2b mostra os módulos principais de um A-10: a parte superior chamada de *Dropper*, onde há a câmara de vácuo; a parte inferior denominada IB, *Interferometer Baser*; e a Central de Controle, acompanhada de um *notebook*, que monitora o funcionamento do equipamento.

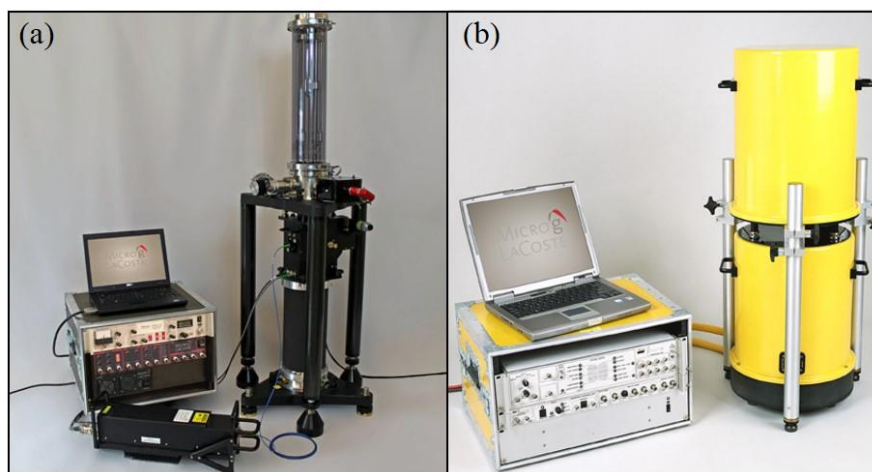


Figura 2 - Gravímetro FG-5 (a) e gravímetro A-10 (b) (www.microglacoste.com).

### Determinação Relativa de Gravidade Terrestre

Como a própria denominação sugere, nas determinações relativas são medidas diferenças de “ $g$ ” ao invés de grandezas absolutas. O princípio de funcionamento da maior parte desses instrumentos pressupõe que o peso de um corpo, sustentado por um sistema elástico, seja contraposto à força de gravidade. Assim que o sistema entra em equilíbrio, as observações podem ser realizadas. Desta forma, medições empreendidas entre dois ou mais sítios permitem que as correspondentes diferenças de gravidade sejam deduzidas.

Para que essas medições diferenciais ou relativas façam sentido no contexto geodésico, torna-se imprescindível que haja, ao menos, uma estação de referência com o valor de “ $g$ ” conhecido, inserida nos circuitos gravimétricos. Tais estações fazem parte das redes de referência de gravidade. As redes de referência ditas relativas, menos acuradas do que as redes absolutas, são determinadas a partir de gravímetros relativos. Destaque merecido deve ser dado à antiga, mas importante, *International Gravity Standardization Net* (IGSN), implantada em âmbito mundial no ano de 1971<sup>10</sup>. Complementando, cabe ressaltar que a maioria

<sup>10</sup> A IGSN71, como é mais conhecida, é abordada em diversas fontes. Sugere-se a leitura de Moreli (1971).

das estações gravimétricas relativas estabelecidas no mundo pertence à chamada Rede de Densificação.

Os gravímetros relativos são produzidos em série há mais de oitenta anos e vêm, desde então, atendendo às necessidades práticas da comunidade usuária. Embora menos precisos do que os absolutos, via de regra são mais leves, portáteis e consideravelmente mais baratos. Estima-se que haja algumas dezenas desses equipamentos distribuídos pelo Brasil.

Exceções à regra ficam por conta de gravímetros destinados ao monitoramento da crosta terrestre, como o Supercondutor e o Gphone que, embora sejam instrumentos relativos, têm princípios de funcionamento diferenciados, custos bem mais elevados e podem ser considerados como uma categoria à parte.

### **Gravímetro LaCoste & Romberg - modelo G**

Em 1932, Lucien LaCoste e Arnold Romberg iniciaram o projeto de um sismógrafo vertical. LaCoste buscou melhorar o modelo de sismógrafo então existente, levando-o à concepção da chamada mola de comprimento zero, uma inovadora maneira de se avaliar a aceleração da gravidade. Segundo o físico Robert Hooke (1635 – 1703), uma mola seria capaz de exercer uma força proporcional ao comprimento de sua deformação, em sentido contrário, tal teoria redundou na lei de Hooke. LaCoste imaginou, então, uma mola pré-tensionada, contrariando as premissas de Hooke, fazendo com que a força exercida fosse proporcional ao comprimento total, e não apenas ao comprimento de deformação da mola.

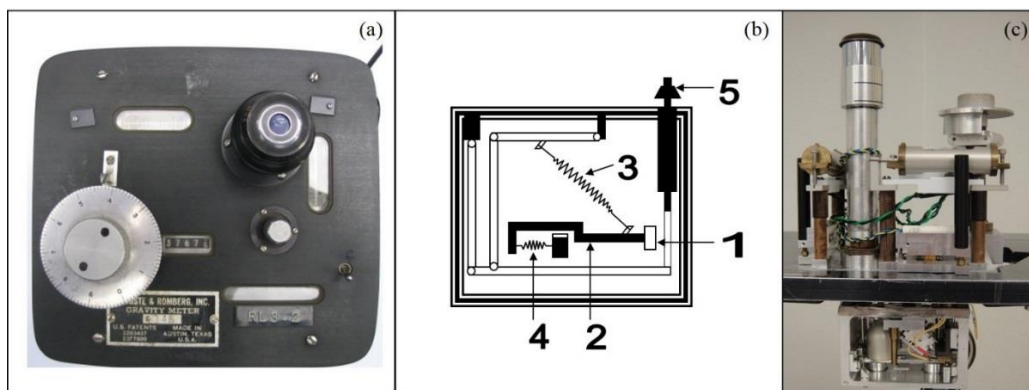
Esse artefato revolucionou a concepção presente na idealização de sismógrafos e gravímetros e credenciou seu inventor a fundar a empresa LaCoste & Romberg INC. Poucos

anos se passaram até que a empresa ganhasse renome mundial e se consolidasse como a mais expressiva fábrica de instrumentos medidores de gravidade até o seu fechamento, por volta de 2010.

A versão Geodésica do gravímetro L & R, daí a denominação modelo G, foi concebida em meados do século passado com o intuito de efetuar medidas em qualquer ponto do planeta Terra. Desde então, tem demonstrado eficácia sob as mais variadas condições de temperatura, tornando-o apto a ser usado em qualquer lugar onde o ser humano tenha condições de interagir com o meio ambiente. Por essas e outras razões, esse equipamento foi, e continua sendo, o gravímetro mais difundido no mundo (Gemael, 1999; Castro Junior, 2005).

Em que pese a aparência um tanto simplificada, conforme se vê na Figura 3a, há grande complexidade em sua composição, exigindo redobrada atenção no trato com o equipamento. Teoricamente o manuseio do L&R é simples. Entretanto, para se proceder às calibrações e ajustes periódicos, é conveniente um operador experiente e metucioso. Atenção adicional deve ser dada à posição da linha de leitura e aos cuidados requeridos antes, durante e depois das medições propriamente ditas.

O princípio de funcionamento encerra um sistema sensor composto por um conjunto de molas de quartzo e hastes que sustentam uma massa. Esse mecanismo funciona em um ambiente teoricamente isolado de pressões atmosféricas externas e é apresentado na Figura 3 (b) (c), fornecida pelo próprio fabricante e elucidada pelo texto subsequente. O gravímetro é termostatizado para estabilizar termicamente o sistema elástico. Por isso deve ser mantido a uma temperatura constante que é atingida automaticamente em duas horas. Contudo, as medições somente devem ser iniciadas depois de quatro horas após a conexão à corrente elétrica ou a uma bateria.



**Figura 3** - Vista superior do gravímetro L&R (a), mecanismo do gravímetro (b) e parte interna do equipamento (c).

O sistema sensor da gravidade consiste numa massa (1) presa à extremidade de uma barra horizontal (2) sustentada pela mola de comprimento nulo (3). A mola de amortecimento (4) forma um pivô flutuante, eliminando, com isso, qualquer fricção no sistema móvel.

### Gravímetros Scintrex

Com uma proposta inovadora, a empresa canadense Scintrex trouxe ao mercado o gravímetro CG-5. Seu funcionamento é baseado em um sistema de molas de quartzo fundido que busca colocar uma massa em equilíbrio. Portátil e de fácil operação foi o substituto natural do antigo L&R, sendo atualmente, até por falta de uma concorrência competitiva, o gravímetro mais comercializado no Brasil. Apostando num perfil eletrônico automatizado de medição e processamento, o CG-5 substituiu seu antecessor, o CG-3. Este, pouco difundido no Brasil.

O CG-5 possibilita a obtenção de “ $g$ ” em poucos minutos com notável precisão (Figura 4). No entanto, determinados aspectos operacionais merecem ser comentados. Talvez pela grande quantidade de componentes eletrônicos, alguns desses equipamentos apresentaram problemas durante levantamentos conduzidos em condições severas, sobretudo em regiões úmidas e quentes, como é o caso da Amazônia. Outra questão diz respeito ao desempenho heterogêneo dos aparelhos, fazendo com que uns apresentem melhores resultados do que outros. Tais circunstâncias acarretam a necessidade de um constante monitoramento dos resultados disponibilizados e ainda de cuidados adicionais por parte dos operadores, incluindo ajustes e calibrações periódicos.



**Figura 4** - Detalhes do gravímetro CG-5 (<http://www.scintrexltd.com>).

Em 2016 a Scintrex divulgou a nova geração de gravímetro, intitulado CG-6 (Figura 5). Este equipamento possui recursos novos e aprimorados, tal como *bluetooth* e um computador *tablet* para operação remota, além de uma redução de 1/3 no tamanho e peso, em comparação ao CG-5. O *software* de processamento (Lynx LG) também é uma novidade. Até o momento os autores desconhecem a presença deste modelo em território nacional.



**Figura 5** - Gravímetro CG-6 (<http://www.scintrexltd.com>).

**GRAVIMETRIA SATELITAL**  
**LAGEOS - LAsER GEODYNAMICS Satellite**

Em 1976, surge o primeiro satélite voltado para estudos geodinâmicos da Terra. Desenvolvido pela NASA, o LAGEOS iniciou a era dos satélites gravitacionais. Um segundo satélite, o LAGEOS-2, foi fabricado pela Agência Espacial Italiana e lançado em 1992. Estes dois satélites foram construídos especificamente para serem usados pelo sistema SLR (*Satellite Laser Ranging*) e, curiosamente, não possuem instrumentos a bordo, têm apenas um conjunto de 426 refletores (Figura 6) instalados numa esfera metálica de sessenta centímetros de diâmetro. Dentre as aplicações divulgadas pelos fabricantes, destacam-se as seguintes: determinar com exatidão a forma do planeta, proporcionar a correta posição do satélite com relação à Terra e monitorar os movimentos das placas tectônicas associados à deriva continental.



**Figura 6 - LAGEOS 1**

(<http://mix.msfc.nasa.gov/IMAGES/HIGH/7667283.jpg>).

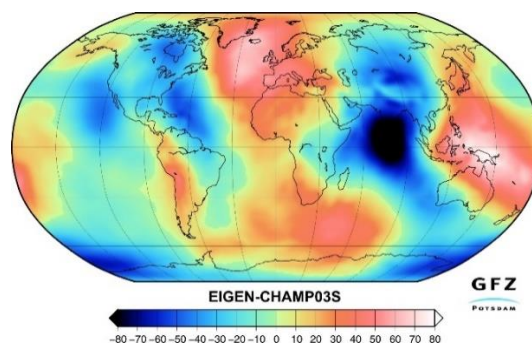
### **CHAMP - CHAllenging Minisatellite Payload**

Em meados do ano 2000 surgia a primeira das chamadas novas missões gravimétricas espaciais, dando início à década internacional dos geopotenciais, considerada pela comunidade científica como sendo o marco fundamental para um detalhamento sem precedentes do campo gravitacional terrestre (Lobianco, 2005). Segundo a mesma autora, a grande vantagem dos dados advindos exclusivamente desses satélites fica por conta da homogeneidade dos mesmos, evitando soluções deterioradas por informações terrestres imprecisas ou inacuradas.

A CHAMP foi uma missão satelital de origem alemã para pesquisa atmosférica e geocientífica. Teve como objetivo o reconhecimento do campo de gravidade da Terra (geoide) e do campo magnético, bem como investigações do campo elétrico.

Durante cinco anos, a partir de seu lançamento, em julho de 2000, a missão esteve em órbita a uma altitude inicial de 454 km. Com o decorrer da missão, visando à realização de estudos mais densos sobre o campo de gravidade, a altitude foi sendo diminuída para 300 km (Lobianco, 2005).

A missão viabilizou inovadoras medições simultâneas de alta precisão do campo magnético e gravitacional da Terra, uma importante evolução das pesquisas de geopotencial. Paralelamente, deu origem a um modelo do campo gravitacional global, ou Modelo Global do Geopotencial (MGG), quatro vezes mais preciso do que os anteriores, a partir de poucos meses de observação. O primeiro desses foi nomeado de EIGEN-2 (Reigber et al., 2003), e foi desenvolvido em termos de série de funções harmônicas esféricas até grau e ordem 120. A Figura 7 apresenta o modelo do geopotencial EIGEN-03S, retratando ondulações geoidais após 33 meses de dados.



**Figura 7 - Modelo EIGEN-03S (metros) (GFZ, 2015).**

Além disso, se tornou uma missão piloto para o uso pré-operacional das observações espaciais de GPS para pesquisa atmosférica e ionosférica, bem como para aplicações em monitoramento e previsão climática (GFZ, 2015). Foi a primeira vez que um satélite em baixa altitude de órbita contou com receptores GPS, permitindo que o seu posicionamento ocorresse satélite-a-satélite, com a precisão de poucos centímetros (Schwintzer; Reigber, 2002). Esses sinais GPS possibilitaram o monitoramento continuado das perturbações da órbita do satélite. Imagens do satélite e do princípio considerado no posicionamento estão disponíveis na Figura 8. A missão teve fim no dia 09 de setembro de 2010.



**Figura 8** – Imagens ilustrativas do satélite CHAMP e do posicionamento satélite-a-satélite (<http://op.gfz-potsdam.de/champ>).

### GRACE - Gravity Recovery And Climate Experiment

Em 2002, é lançada a segunda das modernas missões gravimétricas espaciais, decorrente de uma parceria entre a NASA e o *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR) da Alemanha. A missão GRACE, composta de dois satélites gêmeos numa órbita inicial de aproximadamente 500 km de altitude, foi desenvolvida visando o estudo das variações temporais do campo gravitacional da Terra advindas da distribuição de massas sazonais, anuais e de longo período entre a atmosfera, hidrosfera e criosfera do planeta (Schwintzer; Reigber, 2002).

Além dos aspectos gravitacionais, GRACE foi também responsável por examinar como a atmosfera afeta os sinais do *Global Positioning System* (GPS). Pretendia-se à época que a missão melhorasse dados geocientíficos priorizando a Geodesia, Glaciologia, Hidrologia e Oceanografia. Após a fase inicial da missão, o primeiro MGG publicado, com base em análises preliminares de dados obtidos, já apresentou resultados de 10 a 50 vezes mais precisos do que qualquer outro modelo gravitacional anterior que atuasse em faixas médias ou longas de comprimento de onda.

Essa combinação de dois satélites enviados simultaneamente ao espaço foi uma importante evolução em relação à missão CHAMP e todas as demais anteriores, uma vez que novos dados foram obtidos a partir das variações de velocidade e, consequentemente, de aceleração entre os dois satélites. Tais variações ocorrem de maneira sutil, devido principalmente às alterações da configuração física da superfície do planeta. Uma vez sobre os oceanos, ambos os satélites mantêm uma distância

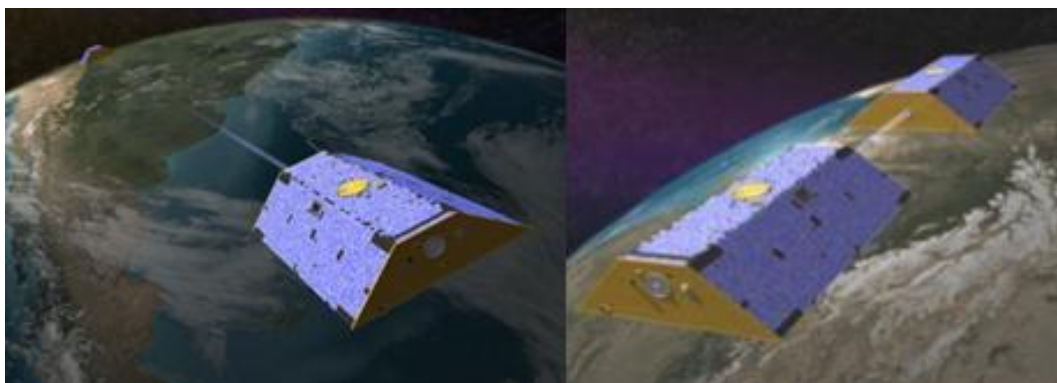
praticamente constante entre si, cerca de 220 km. Ao entrar numa região sobre maior volume ou densidade de massa, o satélite que viaja à frente sofre um sutil aumento de sua velocidade, que pode ser mensurado pelo satélite que o segue e que sofre as mesmas oscilações de aceleração, mas com algum atraso. Da mesma forma, a velocidade é sutilmente reduzida ao sobrevoar regiões de menor densidade.

Os acelerômetros, equipamentos de alta precisão localizados no centro de massa de cada um dos satélites, são responsáveis por identificar variações de aceleração não gravitacionais, como as que ocorrem devido a eventos atmosféricos. Desta forma, os dados da missão são filtrados, considerando apenas efeitos de causa gravitacional. Atualmente, medições de tais variações ocorrem através da emissão de micro-ondas entre ambos os satélites. Espera-se que, futuramente, seja possível aumentar a precisão de tais medições com o uso de tecnologia a *laser*.

Das três missões que compunham essa nova era espacial, a missão GRACE foi a que mais tempo perdurou, tendo finalizado em 17 de outubro de 2017 (<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/grace#mission-status>).

A missão GRACE terá sequência com o lançamento do satélite GRACE-FO (*Follow-On*), previsto para o início de 2018 (<https://gracefo.jpl.nasa.gov/>). Os dois satélites gêmeos estarão separados em 220 km. Essa missão terá como objetivo rastrear o movimento da água da Terra para monitorar as mudanças no armazenamento de água subterrânea, o monitoramento de quantidade de água em grandes lagos e rios, umidade do solo, gelo e geleiras, além do nível do mar

causado pela adição de água ao oceano (JPL, 2017). Imagens dos satélites GRACE são apresentadas na Figura 9.



**Figura 9** - Imagens do satélite GRACE ([http://www.nasa.gov/mission\\_pages/Grace/multimedia/gallery](http://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/multimedia/gallery)).

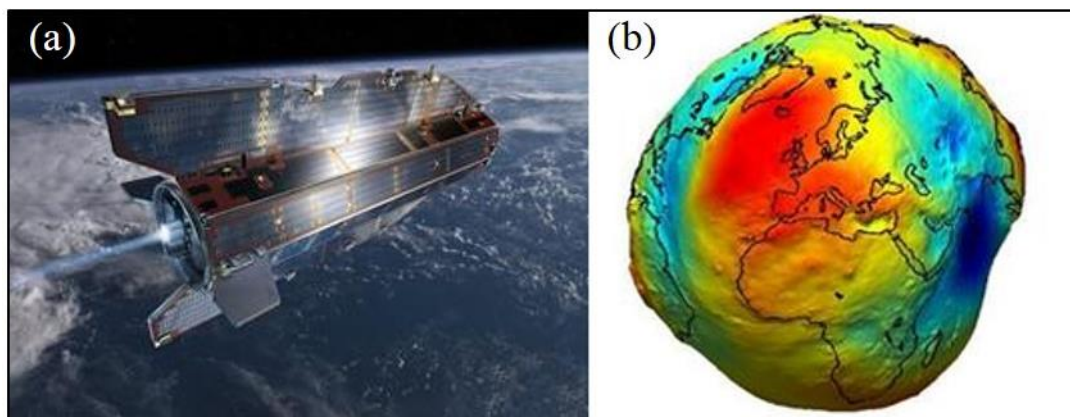
### **GOCE - Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer**

A terceira e última das novas missões espaciais foi idealizada pelo *European Space Operations Centre* (ESA). Alçada ao espaço no ano de 2009, a missão GOCE objetivava analisar as variações do campo gravitacional da Terra com precisão, em termos de ondulação geoidal  $\sim 1\text{-}2$  cm e distúrbio da gravidade  $\sim 1\text{-}2$  mGal, para uma resolução melhor que 100 km. Além dessas medições referentes à gravidade, iria explorar aspectos sobre a circulação das massas oceânicas. De fato, ao utilizarem os dados da missão combinados com dados de altimetria, cientistas foram capazes de produzir o MGG mais preciso já feito sobre as correntes oceânicas (ESA, 2015).

Os idealizadores do projeto pretendiam que o satélite estivesse em órbita com a menor altitude possível a fim de captar com maior intensidade os sinais do campo gravitacional. Atingiu-se, portanto, uma altura inicial aproximada de 260 km, que foi reduzida durante o último ano da missão para algo em torno de 235 km.

O principal instrumento da missão GOCE, o *Electrostatic Gravity Gradiometer*, consistia num conjunto de acelerômetros de três eixos, montados numa estrutura extremamente estável. Até então, esse gradiômetro chegava a ser 100 vezes mais sensível que qualquer outro sensor do mesmo tipo que tenha sido enviado ao espaço. Assim como ocorreu com seus dois antecessores CHAMP e GRACE, o satélite

contava ainda com um receptor de sinal GPS, utilizado como instrumento de rastreamento posicional, além de um retro-refletor que permitia monitorar com precisão a órbita do satélite por meio do SLR (ESA, 2015). A missão GOCE pode representar os MGGs desenvolvidos em séries de funções harmônicas esféricas até grau e ordem 250-300. Cabe destacar que um MGG é um conjunto de coeficientes da função potencial gravitacional da Terra desenvolvida em série de funções harmônicas esféricas. Diversos MGGs têm sido disponibilizados para a comunidade; alguns desses modelos utilizam informações derivadas das missões LAGEOS, GRACE e GOCE. , tais como: EIGEN-6S4(v2) (Förste; Bruinsma, 2016), EIGEN-6C4 (Förste et al., 2014) e GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R5 (Bruinsma, et al., 2013). Isso ocorre porque, cada uma das missões possui uma contribuição específica em termos de coeficientes da função potencial que retrata as heterogeneidades do planeta Terra. As informações advindas do LAGEOS contribuem para os baixos graus da função potencial (exemplo: o coeficiente  $C_{2,0}$  modela a Terra em termos de achatamento). Os dados da missão GRACE são utilizados para modelar a forma da Terra no que diz respeito aos médios graus (até grau e ordem 70-90). Por fim, as informações do GOCE modelam o planeta para os graus mais altos (ICGEM, 2017). Fotos ilustrativas do satélite e do MGG disponibilizado pelo GOCE, retratando a forma da Terra, podem ser visualizadas através da Figura 10.



**Figura 10** - Satélite (a) e Geoide (b) inerentes à missão GOCE. (<http://www.esa.int/spaceinimages/Images>).

Enquanto esteve em órbita, GOCE forneceu importantes dados para o entendimento da circulação das correntes oceânicas, das variações de nível dos mares, bem como da dinâmica das geleiras e do interior do planeta Terra. Além disso, a missão informou sobre a densidade do ar e velocidade dos ventos na alta atmosfera. Inicialmente, era esperado que o satélite da missão GOCE permanecesse durante 20 meses em órbita, entretanto em novembro de 2013, o satélite chegou a seu fim natural devido à falta de combustível, estendendo o tempo inicialmente previsto da missão para quase cinco anos de duração (ESA, 2015).

### GRAVIMETRIA AÉREA E MARINHA

No início do século XIX, um grupo de pesquisadores do Instituto de Geodesia de Potsdam realizaram medições da gravidade a bordo de navios nos oceanos Índico, Pacífico e Atlântico. Ao estudar os resultados obtidos, o físico húngaro, Loránd Eötvös, observou diferentes padrões nas medições: ao mover-se para o oriente, os equipamentos registravam um decréscimo do valor da gravidade quando comparado aos deslocamentos em direção ao ocidente. Surgiu, então, o conceito do efeito de Eötvös, que visava à correção dos dados provenientes de medições da gravidade realizadas em movimento e, até hoje, ainda é utilizado em pesquisas de gravimetria marinha e aérea (Persson, 2005).

Durante a segunda guerra mundial, surgem as tecnologias aerogeofísicas para a detecção aérea de submarinos (Hildenbrand, 2002). Anteriormente, utilizavam-se para esta função sistemas aeromagnéticos; na década de 1950, iniciam-se os testes de aerogravimetria, com os

gravímetros *air-sea* L & R, mas sem resultados satisfatórios. Desde 1955, os gravímetros *air-sea*, produzidos em parceria por Lucien LaCoste e Arnold Romberg, eram utilizados em submarinos. A gravimetria marinha, assim como a aérea, encontrava como maior desafio a neutralização das variações de aceleração produzidas pelo meio de transporte do equipamento. Aos efeitos resultantes do movimento da Terra, seriam somados, portanto, o movimento do sistema de medição em relação à superfície.

Em 1965, foi vendido o primeiro gravímetro L&R com plataforma estabilizadora. Na década de 1970, as plataformas estabilizadoras triaxiais foram desenvolvidas para o ambiente gravimétrico. Nos anos seguintes, encontraram-se maneiras de reduzir a influência das acelerações produzidas pela locomoção dos sistemas de medição. Tanto no domínio oceânico quanto no aéreo, as tecnologias gravimétricas passaram por diversos ciclos de evolução, culminando com o emprego da eletrônica digital, a partir dos anos de 1970, e da utilização dos sinais de satélite do sistema GPS, no final da década de 1980. No início dos anos 2000, surgem em países de tradição na exploração de recursos minerais, como Canadá e Austrália, novas tecnologias aerogeofísicas na área de aerogravimetria gradiométrica (Hildenbrand, 2002).

Como exemplos de equipamentos utilizados no Brasil há dois sistemas de medição de gravidade fabricados pela principal empresa de tecnologia aeroespacial, a Lockheed Martin, sediada nos Estados Unidos. São eles os sistemas AGG Falcon (*Airborne Gravity Gradiometer Falcon*), utilizado em aeronaves,

e 3D-FTG (*Full Tensor Gravity Gradiometer*), visualizado na Figura 11, utilizado tanto em aeronaves quanto em navios (Galbiatti et al, 2011). Esses dois sistemas são tecnologias de plataforma móvel, com múltiplos acelerômetros que medem os gradientes da

gravidade. Além disso, utilizam o monitoramento dos ruídos e vibrações sofridas pelo meio de locomoção, através de acelerômetros externos, a fim de realizar posterior compensação dos dados (Galbiatti et al, 2011).

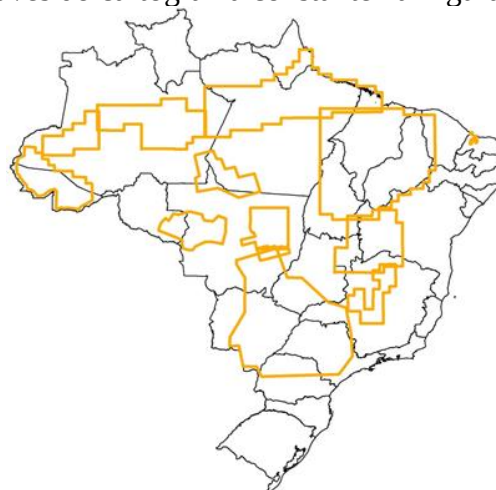


**Figura 11** - Sistema 3D - FTG (Galbiatti, 2011).

Embora as pesquisas de gravimetria em ambiente oceânico e aéreo encontrem diversas dificuldades quanto à estabilização do sistema e à compensação de ruídos, estas possuem a vantagem de possibilitar medições de menores comprimentos de onda quando comparadas aos dados provenientes de satélites, ou, ainda, de tornarem viáveis estudos em territórios onde o percurso por terra seria de extrema dificuldade, como no caso da floresta amazônica.

No Brasil, o primeiro levantamento aerogeofísico se deu em 1952, sob os auspícios do então Conselho Nacional de Petróleo (CNP), na Bacia Sedimentar do Paraná, região de Botucatu, e foi executado pela LASA – Levantamentos Aerofotogramétricos S.A. (CPRM, 2015). Nos dias atuais, a Amazônia ainda representa um grande desafio, não somente pela dificuldade de exploração por terra, mas também por ser extremamente carente de levantamentos aerogeofísicos (Rigoti et al., 2000). Encontra-se na aerogravimetria uma alternativa eficaz e de custo favorável para a detecção de estruturas regionais, algo que poderia levar ao conhecimento aprofundado das bacias sedimentares e escudos antigos da região amazônica, identificando áreas mais favoráveis à exploração mineral (Rigoti et al., 2000). Atualmente, o Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG), disponibiliza grande parte do acervo aerogravimétrico

empreendido em terras brasileiras, visualizado através do cartograma constante na Figura 12.



**Figura 12** - Acervo de aerogravimetria no BNDG (ANP, 2015).

As variações do campo de gravidade estão diretamente relacionadas às propriedades físicas e estruturais do interior da Terra. Resultados advindos da gravimetria marinha permitem obter diversas informações sobre o relevo e estrutura interna do assoalho oceânico. Tais resultados, associados às medições de altimetria por radar e sonar, do relevo oceânico, servem para investigar a estrutura da tectônica global e das margens dos continentes (Fairhead et al., 2001).

O uso de um radar em órbita permite medir com precisão a topografia dos oceanos, que é aproximadamente uma superfície equipotencial (Sandwell et al., 2014). Nesse

sentido, diversas missões de radar de alta precisão ocorreram e apoiaram as atividades gravimétricas marinhas. Através do Centro de Estudos Topográficos do Oceano e da Hidrosfera (CTOH, *Center for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere*) é possível se obter dados e produtos advindos de algumas dessas missões altimétricas.

Embora seja bastante esparsa, a cobertura gravimétrica dos navios sobre os oceanos é importante ferramenta para o mapeamento de estruturas tectônicas, especialmente bacias oceânicas profundas. Estas geralmente possuem espessa camada de sedimentos que chega a se estender por muitos quilômetros em direção à litosfera e contribuem para encobrir as características originais do relevo (Sandwell et al., 2014). Assim como a gravimetria aérea, as medições marinhas resultam em dados sempre passíveis de ajuste (Paolo, 2009). Diversos empecilhos podem ocorrer durante a obtenção de dados gravimétricos marinhos, acarretando a necessidade de cuidados ou ajustes voltados à sensibilidade do equipamento de medição e seu nivelamento, ao equacionamento de problemas ligados ao posicionamento dos navios, à deriva instrumental e à falta de estações de referência para abertura e fechamento das linhas. Imagem de um gravímetro Microg Lacoste, modelo TAGS-6 Dynamic pode ser vista na Figura 13.



**Figura 13** - Gravímetro marinho L&R (<http://www.cgg.com>).

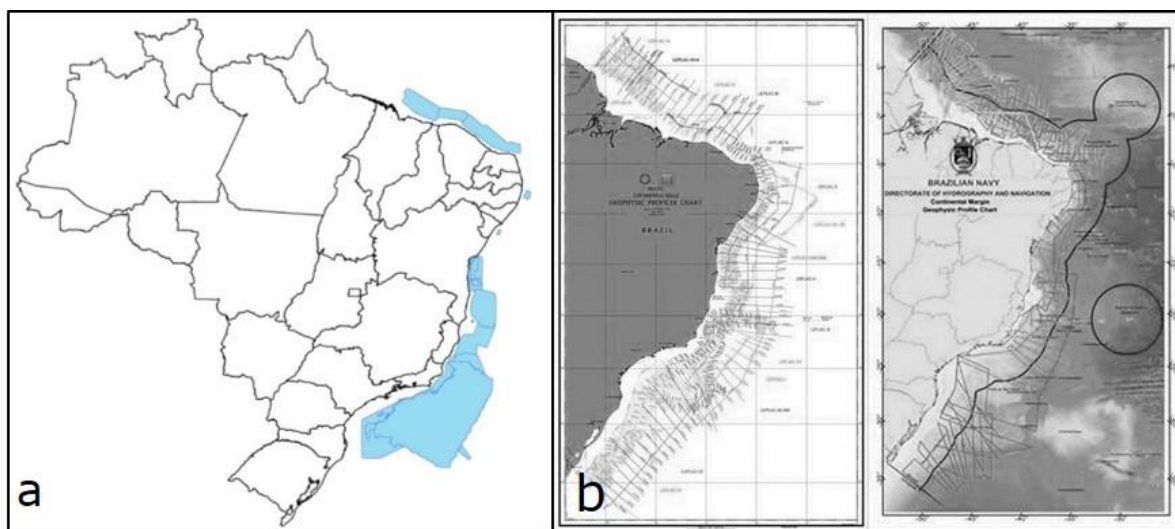
Trazendo a questão à esfera nacional, a Marinha Brasileira, por meio da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), coordena as

atividades do Grupo de Trabalho para Acompanhamento da Proposta do Limite Exterior da Plataforma Continental Brasileira (GT LEPLAC), instituído pela portaria Nº 330/MB, de 15 de dezembro de 2005. O LEPLAC é um programa do Governo Brasileiro e faz parte do projeto da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), que estabelecerá o limite exterior da plataforma continental da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), além das 200 milhas, com base na aplicação dos critérios do artigo 76, da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM).

No âmbito desse projeto foram considerados conceitos geodésicos, hidrográficos, geológicos e geofísicos, cuja aquisição de dados contou com a participação da Petrobras, de Universidades e de diversos navios hidrográficos e oceanográficos da DHN. A primeira etapa de levantamentos produziu mais de 92 mil quilômetros de perfis gravimétricos. Foi conduzida entre os anos de 1987 e 2005, ao longo da margem continental, do Oiapoque ao Chuí, até uma distância do litoral de aproximadamente 350 milhas.

Uma nova série de levantamentos geológicos, geofísicos e hidrográficos ao longo da margem brasileira se fez necessária, a fim de respaldar uma proposta revisada, enfocando aspectos técnicos e pontos discordantes das recomendações da Comissão de Limites da Plataforma Continental (CLPC), das Nações Unidas, que não aceitou integralmente o pleito inicial encaminhado pelo GT LEPLAC. Nesse novo período, mais de 81 mil quilômetros de perfis gravimétricos foram levantados (Marinha do Brasil, 2015).

Com base no exposto, depreende-se que o Brasil possui grande quantidade de dados referentes aos levantamentos gravimétricos marítimos efetuados em sua costa. O primeiro acervo, mostrado no cartograma inserido na Figura 14 a, está disponibilizado no BNDG. O outro grande banco de dados, apresentado nos mapas constantes da Figura 14 b, sintetiza as aquisições gravimétricas, batimétricas, sísmicas e magnetométricas, auferidas nos dois grandes esforços empreendidos pelo LEPLAC.



**Figura 14** - Dados de gravimetria marinha constantes no BNDG (ANP, 2015) (a) e acervo LEPLAC (MB/LEPLAC, 2015) (b).

Mesmo que não estejam espacialmente localizadas sobre a terra firme, todas essas informações, agregadas aos dados gravimétricos aéreos, terrestres e satelitais podem ser aproveitadas para fins geodésicos, sobretudo na elaboração de modelos geoidais,

uma vez que a metodologia empregada no MAPGEO2015, por exemplo, considera uma faixa adicional de aproximadamente 100 quilômetros no entorno da região continental efetivamente modelada.

### PRINCIPAIS INSTITUIÇÕES BRASILEIRAS PRODUTORAS DE GRAVIMETRIA

Decorridos mais de três séculos após a primeira determinação gravimétrica no Brasil, ainda não há uma instituição que se incumba da gestão das atividades gravimétricas em âmbito federal. Recentemente a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), avocou para si a organização do BNDG, que congrega informações da maior parte das instituições produtoras. Entretanto, a lacuna deixada pela ausência de uma coordenação e controle das atividades em território nacional ainda persiste.

Por conta dessa atipicidade, advinda de uma ausência de gerenciamento, algumas organizações há anos vêm conduzindo seus levantamentos, quase sempre a partir de iniciativas individuais isoladas, visando contemplar seus propósitos institucionais. Analogamente, universidades com disciplinas em Geofísica ou Geodesia, executam seus afazeres gravimétricos voltados aos fins acadêmicos. Em síntese, por mais que haja convergência dos objetivos, esforços são duplicados e os dados nem sempre compartilhados.

Atendendo ao escopo deste artigo, serão tecidas considerações sobre a atuação das

principais entidades que produzem gravimetria no país, enfatizando-se aquelas que atendem às metas geodésicas que, por conseguinte, possibilitam ganhos ambientais. Os critérios adotados nesta priorização dizem respeito ao volume e abrangência dos dados produzidos. Algumas universidades deixaram de ser esmiuçadas devido à estrita vinculação aos objetivos acadêmicos concernentes com as atividades geofísicas, fugindo, portanto, aos propósitos do artigo.

#### Observatório Nacional (ON)

A instituição brasileira pioneira nas atividades gravimétricas é o ON. Em outubro de 1851 foram empreendidas medições com o pêndulo de Foucault. Posteriormente, nos primeiros anos do século XX, novas medições foram realizadas, utilizando-se um dispositivo tetrapendular de Sterneck. Em 1948, foram efetuadas determinações com um pêndulo Brown (ON, 2015).

Nos anos subsequentes, diversas determinações foram conduzidas pelo Grupo Woollard, contemplando a mesma estação, localizada na atual Sede do ON, com valores absolutos e vinculando-a ao sistema mundial existente à época. Em decorrência dessas

determinações, a citada estação do ON chegou a ser considerada como sendo o *datum* gravimétrico brasileiro (Castro Junior, 2005). Em meados do século passado, mais precisamente no ano de 1955, com a aquisição de um gravímetro Worden, houve o início de uma nova etapa de atividades gravimétricas sistemáticas. Em 1967, um primeiro gravímetro L & G, modelo G, foi cedido pelo *Inter American Geodetic Survey* (IAGS) e passou a operar em substituição ao antigo Worden.

Atendendo a uma recomendação das comunidades científica e usuária, em 1978 o ON passou a ser responsável pela implantação e manutenção da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB) (Figura 15), que atualmente possui cerca de 620 estações materializadas em vários recantos do território nacional. Em termos gravimétricos essa é a missão mais importante do ON, pois suas informações, disponibilizadas gratuitamente (<http://www.on.br/index.php/pt-br>), propiciam um arcabouço de referência aos levantamentos conduzidos no Brasil e em países fronteiriços.

Em paralelo à implementação da RGFB, o ON estabeleceu no ano de 1996, uma linha de calibração gravimétrica na região de Itatiaia, estado do Rio de Janeiro. Este circuito é composto por cinco pontos criteriosamente materializados a fim de possibilitar a calibração de gravímetros relativos através da variação altimétrica das estações.

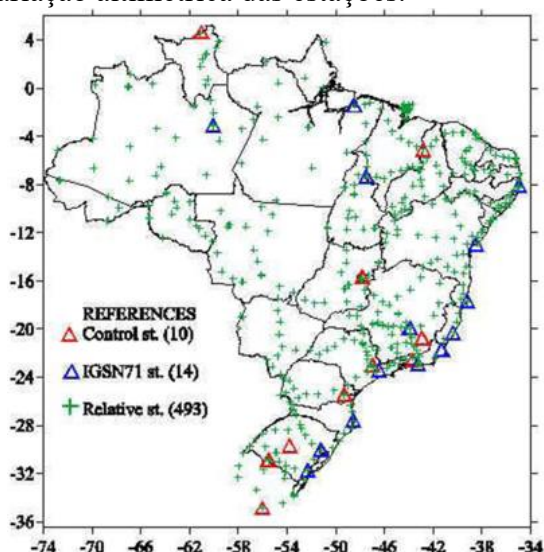


Figura 15 – Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira ([www.on.br](http://www.on.br)).

Entre 2010 e 2011 a RGFB foi aquinhoadada com novas estações insulares, mais

precisamente em Fernando de Noronha e no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Em 2015 foi a vez da Ilha de Trindade. Essas operações contaram com o apoio da Marinha Brasileira (Sousa, 2015).

Reforçando o caráter de pioneirismo no contexto gravimétrico nacional, em 2004 o ON trouxe para o Brasil seu primeiro gravímetro absoluto, um FG5. Dois anos depois chegou o segundo absoluto, um A10. Atualmente, esses equipamentos são utilizados na ocupação de antigas estações da rede de referência relativa, incluindo a linha de calibração de Itatiaia, e na implantação de novas estações absolutas, com o intuito maior de densificar e dar mais consistência à RGFB. Além desses dois equipamentos, o ON conta com cinco gravímetros relativos, sendo três L&R e dois Scintrex CG-5 (ON, 2015).

### Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)

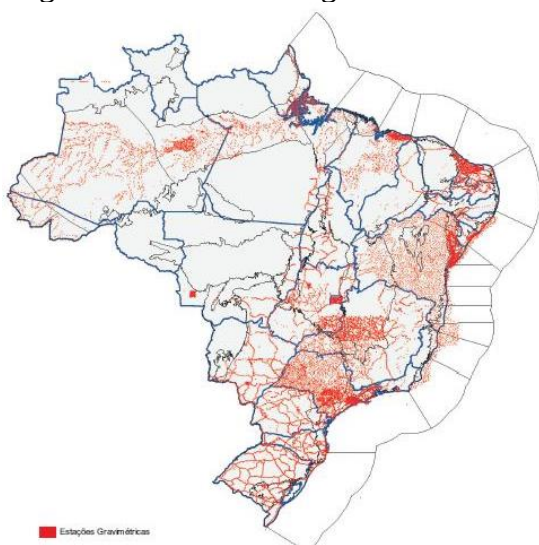
Por meio do decreto nº 2.455, de 14/01/1998, foi criada a ANP, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, com o propósito de ser a instituição reguladora e executora da política brasileira para o setor energético nacional (ANP, 2015).

De imediato a ANP herdou o acervo gravimétrico terrestre que dispunha a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), advindo de levantamentos conduzidos ao longo das principais bacias sedimentares do país, por conta da prospecção petrolífera. Adicionalmente, agregou inúmeras informações aerogravimétricas e marítimas, obtidas com a mesma finalidade.

No ano de 2009 a ANP, com o apoio da comunidade científica, tomou a iniciativa de criar o BNDG, contemplando um antigo anseio nacional, com o objetivo maior de consolidar a base gravimétrica nacional, deixando-a prontamente acessível para cumprir as metas geocientíficas que a nação requer (Geofísica Brasil, 2015). Esse imenso acervo de dados, composto inicialmente por 80 mil estações gravimétricas, passou a abrigar informações oriundas de diversas entidades públicas, dentre as quais se destacam a Petrobras, Sociedade Brasileira da Geofísica (SBGf), Universidades, Institutos de Pesquisa e o IBGE.

Posteriormente serão agregadas informações aerogravimétricas e marítimas.

Segundo dispõe Ribamar (2015), o BNDG possui atualmente algo em torno de cem mil estações. Seu conjunto de dados encontra-se disponível através do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP), pelo *site*: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/folderes/2416-bdep-banco-de-dados-de-exploracao-e-producao>. Todo esse acervo pode ser sintetizado e visualizado através do cartograma constante na Figura 16.



**Figura 16** - Acervo do BNDG  
(<http://geofisicabrasil.com>, 2015).

### Serviço Geológico do Brasil (CPRM)

Foi no final dos anos 1970, inserido no Projeto Levantamento Gravimétrico do Estado da Bahia, que os primeiros levantamentos terrestres foram executados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), utilizando um gravímetro Worden (Gomes & Mota, 1980). Com financiamento do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), essa iniciativa teve à frente o Geólogo Nelson Custódio que, na época, era chefe da Superintendência de Salvador (SUREG/SA) da CPRM. Uma segunda investida só veio a ocorrer em meados dos anos 1980, no contexto do Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB), tendo como objetivo distinguir estruturas e corpos geológicos no auxílio ao mapeamento geológico. Tais levantamentos foram conduzidos mediante um convênio entre a CPRM e o ON. Os poucos levantamentos gravimétricos que ocorreram na década de

1990 ficaram por conta de trabalhos de pós-graduação e de levantamentos direcionados às pesquisas hidrogeológicas em pequenas bacias interiores da Região Nordeste (Pinto, 2015).

A partir de 2003, já com a denominação de Serviço Geológico do Brasil, a CPRM deu início à renovação de seus equipamentos e adquiriu quatro gravímetros Scintrex CG-5. Entretanto, a produção gravimétrica só foi retomada em 2011 e, desde então, já foram determinadas cerca de 5900 estações gravimétricas terrestres em diversas áreas do Brasil, voltadas à pesquisa mineral e estudos tectônicos. Em 2013 foi adquirido um aerolevantamento gravimétrico convencional, com direção de linhas de voo Norte-Sul, espaçamento entre as linhas de 3 km e altura de voo de 1100 m.

Segundo Pinto (2015), as perspectivas gravimétricas no âmbito da CPRM são crescentes. Dentro dos projetos aprovados para o ano de 2015, estima-se que serão adquiridos cerca de 4.000 a 5.000 novas medidas gravimétricas terrestres. Em paralelo, novas áreas para a aquisição de dados aerogravimétricos estão planejadas e selecionadas, porém ainda sem previsão de quando serão trabalhadas, pois dependerão dos recursos financeiros disponibilizados pelo governo. As finalidades dessas aquisições são diversificadas, variando desde objetivos regionais, como o estudo de zonas de sutura entre blocos, até pesquisas gravimétricas localizadas em áreas de requerimento mineral da empresa. Informações sobre esse acervo gravimétrico estão disponíveis em (<https://sisgeo.cprm.gov.br/disegeo/>).

### Universidade Federal do Paraná (UFPR)

As atividades de gravimetria na UFPR tiveram início nos anos 1960, sob a liderança de um ícone da Geodesia no Brasil, o professor Camil Gemaél. Os levantamentos em campo começaram com um gravímetro Worden e contaram com o apoio da Petrobrás. O Estado do Paraná foi o primeiro palco de operações, priorizando-se a capital e municípios vizinhos. À época tais atividades eram empreendidas no âmbito do Centro de Estudos em Geodesia, até o ano de 1971, quando passou a ser denominado Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), que perdura

até os dias atuais contribuindo com informações gravimétricas (Freitas, 2015).

No decorrer daquele mesmo ano de 1971, houve a efetiva participação do CPGCG na implantação da primeira grande rede gravimétrica mundial, a IGSN71, com a medição de duas estações principais e uma auxiliar em Curitiba. Nos anos seguintes outro trabalho de porte ocorreu na Ilha de Santa Catarina, ainda contando com o mesmo gravímetro Worden. Em 1976 o L&R número 372 foi incorporado à UFPR, reforçando quantitativa e qualitativamente os levantamentos subsequentes (Freitas, 2015).

A partir de então, ocorreram novas e significativas contribuições gravimétricas nos estados da região Sul. Destaca-se a Rede Paranaense de Alta Precisão, coincidente com as vinte estações da Rede Estadual implantada pelo IBGE. Esta rede teve a contribuição de um gravímetro CG-3 (Santos Junior, 2005). Também merece destaque a estação de marés terrestres, implantada em 1985, dedicada ao monitoramento das diferenças de atração lunissolar no centro de massa terrestre e na superfície; esta estação já recebeu mais de quinze gravímetros de diferentes institutos espalhados pelo planeta (Freitas, 2015).

Durante 1989, outro marco pioneiro foi protagonizado pelo CPGCG, ao trazer para o Brasil o gravímetro absoluto Jilag-3, operado por dois profissionais pertencentes à Universidade de Hannover, com o intuito de dar início à Rede Nacional de Estações Gravimétricas Absolutas (RENEGA)<sup>11</sup>. Contando com o apoio operacional do IBGE, foram medidas naquele ano as sete primeiras estações da RENEGA nas cidades de Brasília, Curitiba, Santa Maria, Teresina, Vassouras, Viçosa e Vinhedo (Gemaél, 1999).

### **Universidade de São Paulo (USP)**

Quando o assunto é geodesia no âmbito da USP, surge naturalmente o nome do Professor Denizar Blitzkow que, há quarenta anos, vem protagonizando episódios gravimétricos no Brasil e em diversos países mundo afora. Há duas vertentes na USP que trabalham com gravimetria. A mais antiga e com

levantamentos em diversas unidades da federação é o Instituto Astronômico e Geofísico (IAG). Posteriormente, a Escola Politécnica da USP (EPUSP) também passou a se envolver com o tema gravimetria aplicada à engenharia e, sobretudo, à ciência geodésica.

Foi em 1977, com a aquisição de um gravímetro L&R, quando foram realizadas as primeiras medições de “g” pela USP nos marcos da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). As ideias de se elaborar um primeiro modelo geoidal para o Brasil surgiram naquela ocasião. Durante anos o IAG deu sequência a esses levantamentos e, atualmente, está mais voltado às pesquisas geofísicas com viés acadêmico.

Em 1981 a USP bateu pela primeira vez às portas da antiga Diretoria de Geodesia e Cartografia do IBGE (DGC), solicitando apoio para aprimorar as atividades de gravimetria direcionadas às necessidades geodésicas do Brasil. Nascia naquele momento uma grande e profícua parceria. No ano de 1991, novos acontecimentos envolvendo a EPUSP motivaram um segundo pedido de ajuda ao IBGE. Foi o advento do projeto *Anglo-Brazilian Gravity Project* (ABGP) que pretendia ampliar a cobertura gravimétrica dos vazios existentes em terras brasileiras.

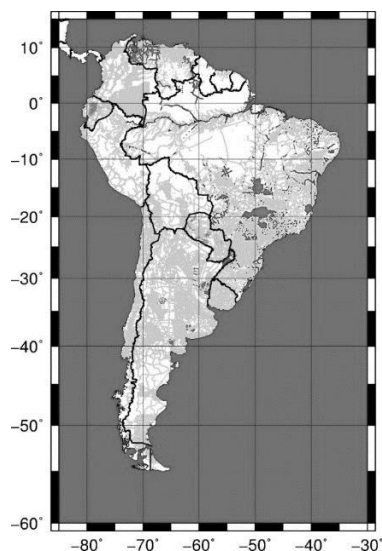
Praticamente uma década depois, outra colaboração mais ambiciosa foi requerida, levando o IBGE a atuar fora das fronteiras nacionais. Tratava-se do *South American Gravity Studies* (SAGS), nova modalidade do ABGP, que estendia o palco de operações aos países vizinhos. Ambos os projetos contavam com a parceria da Universidade inglesa de Leeds e com apoio de equipamentos e financeiro do então *Defense Mapping Agency* (DMA) dos Estados Unidos, hoje denominado *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) (Castro Junior, 2005).

À parte dos esforços voltados às operações em campo, contribuições acadêmicas importantes para o contexto geodésico brasileiro foram disponibilizadas à sociedade pela equipe da EPUSP. Lobianco (2005), apresentou uma metodologia para sistematizar e calcular alturas geoidais e, a partir daí,

<sup>11</sup> Esclarecimentos adicionais sobre a RENEGA podem ser obtidos em Torge et al., (1994) e Luz, (2008).

versões atualizadas do modelo geoidal brasileiro vem sendo processadas pela USP. Adicionalmente foram elaborados procedimentos voltados à implementação de um Modelo Digital do Terreno continental (Matos, 2005; Matos & Blitzkow, 2008), bem como aprimorado o cálculo de modelos geoidais regionais e continentais (Matos et al., 2012). Recentemente foi disponibilizada por Blitzkow et al., (2016), a última versão do modelo geoidal da América do Sul ([http://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/America/Southamerica/reg\\_listSOUTHAMERICA.htm](http://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/America/Southamerica/reg_listSOUTHAMERICA.htm)).

Recentemente, em 2013, a EPUSP intermediou a aquisição pelo IGC, de um gravímetro absoluto A-10. Em que pese o pouco tempo de uso e a complexidade presente na operação desse equipamento, cerca de uma centena de estações absolutas já foram implantadas, medidas e processadas em território brasileiro, na Argentina, Venezuela e Equador. Os esforços ao longo de mais de 30 anos, agregado aos acordos de cooperação dos países sul-americanos, culminaram com um conjunto de mais de novecentos mil estações gravimétricas apresentados na Figura 17.



**Figura 17** - Estações gravimétricas usadas no modelo geoidal sul-americano (Blitzkow, 2016).

### **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**

As atividades gravimétricas do IBGE tiveram início em 1956 com a medição de circuitos voltados à calibração de gravímetros. Posteriormente, especial atenção foi dada ao entorno do ponto *datum* planimétrico,

denominado Chuá, na região de Uberaba, Minas Gerais. Foram inúmeros anos dedicados à densificação dos arredores do *datum* Chuá que, à época, era a estação mais importante do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Como resultado, mais de 2000 estações foram medidas num raio de trezentos quilômetros ao redor de Chuá, com o objetivo maior de efetuar um detalhamento gravimétrico indispensável ao estabelecimento do SGB (IBGE, 2015).

Naqueles anos havia considerável dificuldade para se adquirir ou conseguir a cessão de gravímetros. Paralelamente, cabia ao IBGE exercer a sua missão de gestor do SGB, que perdura até os dias atuais, com a necessária inserção da componente gravimétrica no cenário nacional. No início dos anos 1980, esse quadro teve uma oportuna mudança através da primeira aproximação com a USP, mais especificamente com o IAG. Na ocasião discutiu-se sobre um projeto gravimétrico conjunto voltado, em última análise, à elaboração de um pioneiro modelo geoidal brasileiro. Apenas um gravímetro L&R apoiava tais levantamentos. Essas atividades conjuntas perduraram até 1989, com ênfase nos estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Minas Gerais.

Quase uma década depois da primeira investida envolvendo o IBGE e a USP, ocorreu o início de uma segunda etapa, desta vez com a EPUSP. Tratava-se do projeto ABGP – já mencionado neste artigo. Nascia então a parceria mais expressiva envolvendo essas duas instituições em termos gravimétricos; os objetivos eram traduzidos pela desejável melhoria do incipiente modelo geoidal brasileiro.

O marco inicial do ABGP transcorreu em julho de 1991, com a calibração dos quatro gravímetros L&R disponibilizados ao projeto. Ainda naquele mesmo mês houve os primeiros levantamentos na região central do país. Os anos subsequentes experimentaram intensa atividade e inúmeros vazios gravimétricos existentes em terras brasileiras foram sendo gradativamente preenchidos, priorizando-se as regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste. Destaque merecido deve ser dado às operações na Amazônia, ao longo do Rio Negro e no Pantanal Mato-grossense (Figuras 18a e 18b),

sobretudo pela atipicidade de que estas se revestiam (Castro Junior, 2005).



**Figura 18** - Gravimetria na Amazônia (a) e no Pantanal (b).

Cerca de uma década depois do início do ABGP, sentiu-se a necessidade de se descortinar novos horizontes ampliando a área de trabalho. As razões dessa expansão foram diversas, porém as principais diziam respeito à elaboração de um modelo geoidal único para a América do Sul e à melhoria dos sucessivos MGGs, elaborados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Destarte uma nova fase foi iniciada, já com a denominação ABGS, abarcando alguns países sul-americanos carentes de informações gravimétricas. É importante mencionar os ganhos que a Geodesia brasileira auferiu com tais atividades, tendo em vista que a metodologia de cálculo para o modelo geoidal nacional requer informações de regiões que extrapolam as fronteiras brasileiras. Por conta disso, o IBGE passou a atuar também em algumas nações vizinhas, em prol de uma maior homogeneidade de dados no continente. Ainda que menos intensas tais atividades no exterior ocorrem até os dias atuais.

Outro esforço em âmbito continental ocorreu a partir de recomendações do Grupo de Trabalho “Datum Vertical” (GT-III) do então Projeto SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul) que propôs a adoção de um arcabouço altimétrico homogêneo para o continente, denominado Sistema Vertical SIRGAS (SVSIRGAS), o qual seria definido por meio de dois conjuntos de altitudes: geométricas e físicas; estas obtidas a partir da inserção da componente gravimétrica (SIRGAS, 2005; Luz, 2008; IBGE, 2015). Com base nessas premissas o IBGE estabeleceu o Projeto Macro Circuitos, que agregava informações gravimétricas às

altimétricas, em circuitos da RAAP estrategicamente selecionados, objetivando a materialização do SVSIRGAS em terras brasileiras e visando futuras conexões com os países limítrofes. Em paralelo, o IBGE estabeleceu como diretriz para seus levantamentos gravimétricos as novas linhas de nivelamento geométrico (Luz, 2008). Com quase sessenta anos de atividades gravimétricas, são mais de 42.000 estações medidas em território nacional, conforme mostra o cartograma inserido na Figura 19.



**Figura 19** - Estações gravimétricas medidas pelo IBGE (<https://www.ibge.gov.br>).

Atualmente, o IBGE é a instituição que mais produz gravimetria com objetivos geodésicos no Brasil e possivelmente no continente. Além disso, exerce papel de liderança junto a diversos países da América do Sul, capacitando profissionais e auxiliando no desenvolvimento das respectivas redes

nacionais de gravidade. Adicionalmente, indo ao encontro da comunidade usuária, esforços estão sendo envidados para que, a partir do MAPGEO2015 (Matos et al., 2016), as atualizações do modelo geoidal brasileiro se tornem mais frequentes. Todas as informações

gravimétricas do IBGE estão disponíveis em seu banco de dados (<https://www.ibge.gov.br>), ou através do site da Infraestrutura Nacional de Dados espaciais (INDE) ([www.inde.gov.br](http://www.inde.gov.br)).

## CONCLUSÕES

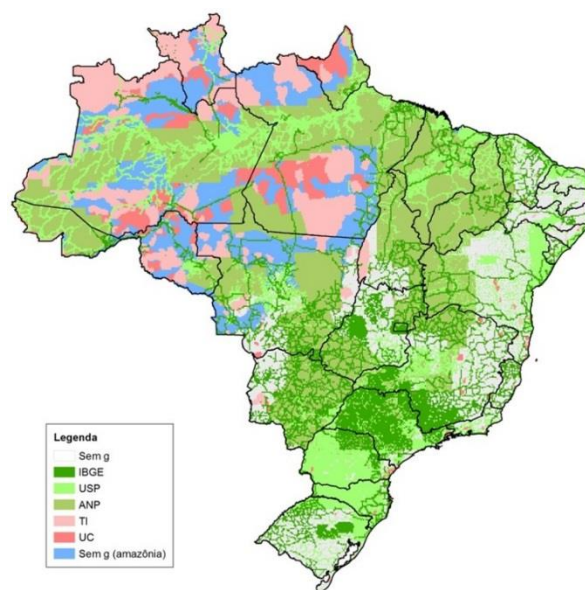
Embora haja circunstâncias adversas, algumas delas mencionadas no corpo deste artigo, o cenário gravimétrico nacional é alvissareiro. A cada dia que passa novas utilidades para a gravimetria têm sido descobertas, ampliando o rol de aplicações em variados ramos de atividade, mormente os de cunho ambiental. As missões gravimétricas satelitais ampliaram os horizontes com respeito à determinação da forma da Terra. Levantamentos aerogravimétricos vêm sendo empreendidos em áreas ermas e praticamente inacessíveis por terra. Informações gravimétricas provenientes do ambiente oceânico estão cada vez mais precisas e podem ser agregadas aos dados terrestres, aéreos e espaciais na busca incessante de um modelo geoidal mais conveniente ao território brasileiro.

Simultaneamente, começa a ganhar volume a ideia de se estabelecer uma Política Gravimétrica Nacional, cujo primeiro passo concreto, apesar de indireto, foi a criação do BNDG, iniciativa impar que congrega as principais instituições produtoras e usuárias. Tudo leva a crer que, no âmbito deste fórum interinstitucional e multidisciplinar, venham a ocorrer as desejáveis orientações que resultem em diretrizes gravimétricas concatenadas que o país se ressonte em não ter.

O IBGE, enquanto gestor do SGB, assumiu uma postura mais proativa com relação às suas incumbências gravimétricas. Desde o início dos anos 1990, tem densificado sistematicamente vários recantos do país e do continente. No âmbito do comitê SIRGAS o IBGE desempenha tarefas relevantes voltadas à unificação geodésica continental. Em cooperação científica com a EPUSP, prepara-se agora para disponibilizar periodicamente à sociedade versões atualizadas e validadas de modelos geoidais brasileiros. Além disso, colabora com algumas unidades da federação

na estruturação dos sistemas geodésicos estaduais correspondentes.

Pensando no amanhã, o IBGE interage com vários segmentos da gravimetria brasileira e continental, visando conceber uma estratégia futura de ação. Com base nos dados existentes no BNDG, a Gerência da Rede Gravimétrica e Desenvolvimento do Geoide (GRGG), apresentou uma análise interessante contida no cartograma inserido na Figura 20, na qual há cerca de 60% do território com algum tipo de cobertura gravimétrica. Nota-se que, dos quase 40% restantes, há vazios em Terras Indígenas (TI) e Unidades de Conservação (UC), a grande maioria no seio da Amazônia Legal.



**Figura 20** - Panorama gravimétrico multi-institucional brasileiro (Nunes, 2015).

Segundo Nunes (2015), o IBGE idealizou linhas de ação que anteveem como melhorar a distribuição gravimétrica nacional e assegurar a consistência dos futuros modelos geoidais brasileiros. Assim sendo, pretende envidar esforços no sentido de contemplar esses vazios existentes, envolvendo diversas modalidades de aquisição gravimétrica. Da maneira como está concebido o panorama futuro, cabe à

gravimetria atuar como instrumento de agregação, superando barreiras institucionais e diplomáticas, a fim de possibilitar uma desejável homogeneização geodésica continental, permitindo que o Brasil e os países sul-americanos possam ter uma referência única para subsidiar as atividades desenvolvidas nas respectivas zonas fronteiriças, com exatidão compatíveis com as necessidades requeridas pelos diversos segmentos da comunidade científica e usuária.

No que tange à gravimetria, hoje o Brasil exerce um papel de destaque no continente Sul-Americano. Nos últimos quinze anos,

equipes brasileiras têm atuado junto à maior parte dos países vizinhos, ajudando no estabelecimento dos respectivos sistemas gravimétricos nacionais e repassando orientações metodológicas de trabalho. Profissionais ilustres como Camil Gemael, recém-falecido, Denizar Blitzkow e Silvio Freitas, exemplos de devoção às lides gravimétricas, levaram ao país e ao mundo contribuições pioneiras e significativas, permitindo que jovens valores doravante assumam, em condições mais propícias, as rédeas técnico-científicas reivindicadas pela gravimetria.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. ANP. BDEP. BNDG. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em 07 jun. 2015.

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.O.C.; GUIMARÃES, G. N.; PACINO, M. C.; LAURIA, E. A.; NUNES, M. A.; CASTRO JUNIOR, C.A.C.; FLORES, F.; GUEVARA, N. H.; ALVAREZ, R.; HERNANDEZ, J. N. Gravity and Geoid Model for South America. In: European Geosciences Union General Assembly 2016, 2016, Viena. EGU Proceedings, 2016.

BRUINSMA, S. L., FORSTE, C., ABRIKOSOV, O., MARTY, J. C., RIO, M. H., MULET, S., BONVALOT, S.; The new ESA satellite-only gravity field model via the direct approach; Geophysical Research Letters, V. 40, N. 14, p. 3607-3612, doi: 10.1002/grl.50716, 2013

CASTRO JÚNIOR, C. A. C. Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul. São Paulo, 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Também disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27072007-150539/>>. 2005.

COYAGO R.R.D. Ajuste de la red de control basico vertical en funcion de numeros geopotenciales. Sangolquí, Ecuador, 108 f. Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniería, Ingeniería Geografica y del Medio Ambiente. Escuela Politecnica del Ejército. 2010

CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Sobre a CPRM, Apresentação. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 20 maio 2015.

DEHLINGER, P. Marine Gravity. Amsterdam, 1978. 322f. Elsevier Scientific Publishing

Company. Parcialmente disponível em: <<http://www.leituraspdf.com.br/livros/marine-gravity>>. Acesso em: 28 jun. 2015

EUROPEAN SPACE AGENCY. ESA. Gravity Mission GOCE. Disponível em: <[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GOCE](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE)>. Acesso em: 27 jun. 2015.

FAIRHEAD, D.; GREEN, C.; ODEGARD, M. Satellite-derived gravity having an impact on marine exploration. The Leading Edge. Society of Exploration Geophysicists: volume 20, nº 8, p. 873 – 876, ago. 2001.

FÖRSTE, C.; BRUINSMA, S.L.; ABRIKOSOV, O.; LEMOINE, J.-M.; MARTY, J.C.; FLECHTNER, F.; BALMINO, G.; BARTHELMES F., BIANCALE, R. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse; GFZ Data Services, doi: 10.5880/ICGEM.2015.1, 2014.

FÖRSTE, C.; BRUINSMA, S.L. EIGEN-6S4 A time-variable satellite-only gravity field model to d/o 300 based on LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. Disponível em: <http://doi.org/10.5880/icgem.2016.004>, 2016

FREITAS, S.R.C. Atividades gravimétricas da UFPR [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por Silvio Rogério Correia de Freitas, Professor Doutor do Curso de Pós-Graduação em Ciências geodésicas, UFPR, <[sfрейtas350@gmail.com](mailto:sfрейtas350@gmail.com)>. Em 10 jun. 2015.

GALBIATTI, H. et al. Sistemas aerogravimétricos gradiométricos 3D-FTG e Falcon na exploração de minério de ferro. Revista Brasileira de Geofísica, Sociedade Brasileira de Geofísica: ano 4, nº 29, p. 801-810, dez. 2011.

Disponível em:  
<http://sys2.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/82/23>. Acesso em: 21 jun. 2015.

GEMAEL, C. Introdução à Geodesia física. Curitiba, 1999. 302f. Editora da Universidade Federal do Paraná.

GEOFÍSICA BRASIL. Banco Nacional de Dados Gravimétricos Terrestres. Disponível em: <http://geofisicabrasil.com/eventos/90-congresso/2252-banco-nacional-de-dados-gravimetricos-terrestres.html>. Acesso em: 06 jun. 2015.

GEOFORSCHUNGSZENTRUM. GFZ Potsdam. The CHAMP Satellite. Disponível em: [http://op.gfz-potsdam.de/champ/systems/index\\_SYSTEMS.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/systems/index_SYSTEMS.html). Acesso em: 20 jun. 2015.

GEOFORSCHUNGSZENTRUM. GFZ Potsdam, The GRACE Mission. Disponível em: <http://op.gfz-potsdam.de/grace>. Acesso em: 20 jun. 2015.

GOMES, R. A. A. D.; MOTTA, A. C. Projeto Levantamento Gravimétrico no Estado da Bahia. Relatório Final. Textos e Mapas. Salvador, CPRM. Convênio DNPM/CPRM, 140 p. 1980.

HILDENBRAND, J.D. Aerogeofísica no Brasil e a evolução das tecnologias nos últimos 50 anos. In: I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica. Anais... São Paulo: [S.I.], 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Geociências. Sistema Geodésico Brasileiro. Rede Gravimétrica. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/gravimetrica.shtm>. Acesso em: 6 jun. 2015.

INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS. GRAVITY FIELDS MODELS. Disponível em: [http://icgem.gfz-potsdam.de/tom\\_longtime](http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime). Acesso em: 6 jan. 2018.

JET PROPULSION LABORATORY. *Next-generation GRACE satellites arrive at launch site*. Disponível em <https://phys.org/news/2017-12-next-generation-grace-satellites-site.html>. Acesso em 20 jan. 2017.

LOBIANCO, M. C. B. Determinação das alturas do geóide no Brasil. São Paulo, 2005. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21022006-162205/>. Acesso em: 26 abr. 2015.

LUZ, R.T. Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS. Curitiba, 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências

da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 2008

MARINHA DO BRASIL. LEPLAC - Limite Exterior da Plataforma Continental Brasileira. Disponível em: <https://www1.mar.mil.br/dhn/?q=leplac>. Acesso em: 17 maio 2015.

MATOS, A. C. O. C. et al. Validação do MAPGEO2010 e comparação com modelos do geopotencial recentes. Boletim de Ciências Geodésicas. Curitiba, V. 18, n. 1, p. 101-122, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/bcg/v18n1/a06v18n1.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2015.

MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Modelagem Digital de Terrenos (MDT) de 3" para a América do Sul (projeto de Pós-Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MATOS, A. C. O. C. Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de Geodesia e Geofísica na América do Sul. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10102005-104155>. Acesso em: 21 maio 2015.

MATOS, A.C.O.C.; BLITZKOW, D.; MACHADO, W.C.; NUNES, M.A.; LENGROBER, N.V.; XAVIER, E.M.L.; FORTES, L.P.S. MAPGEO2015: o novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. Revista Brasileira de Cartografia. V. 68, N. 10, 2016

MELLO, M.P. Sistema Geodésico Brasileiro: ensaio para definição do vetor de orientação geocêntrica através da geodesia física. Curitiba, 268f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. 1973.

MOREIRA, I. C. *A expedição de Couplet à Paraíba: 1698*. Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência, São Paulo, v. 5, p. 23-31, 1991. Disponível em <http://cvc.instituto-camoes.pt/ciencia/e56.html> e <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol4/Num2/v4n2a13.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2015.

MORELLI, C.; GANTAR, C.; McCONNELL R.K.; UOTILA, U. The international gravity standardization network – IGSN 71. Paris: Bureau Central de l'Association Internationale de Géodésie, 1971. 194 p.

NUNES, M.A. Palestra. Rio de Janeiro: IBGE, CDDI, 2015. Palestra proferida por ocasião do Encontro de Gerências Regionais de Geodesia e Cartografia - Modelo Geoidal 2015. Em jun. 2015.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. ON. (Brasil). Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, 1976-1986. Departamento de Geofísica. Rio de Janeiro: ON, 1986. Disponível em: < <http://www.on.br/>>. Acesso em: 14 maio 2015.

PAOLO, F. Altimetria por satélite e gravimetria marinha na representação integrada do campo de gravidade na região costeira do Brasil. São Paulo, 76 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. 2009

PERSSON, A. The Coriolis Effect: Four centuries of conflict between common sense and mathematics, Part I: A history to 1885. In: History of Meteorology 2. Proceedings... Norrköping: Department for research and development, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2005. Disponível em:

<http://www.meteohistory.org/2005historyofmeteorology2/01persson.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2015.

PINTO, L. G. R. Atividades gravimétricas da CPRM [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por Luiz Gustavo Rodrigues Pinto, Chefe da Divisão de Geofísica – DIGEOF, CPRM - Serviço Geológico do Brasil <luiz.pinto@cprm.gov.br>. Em 22 jun. 2015.

REIGBER, CH., SCHWINTZER, P., NEUMAYER, K.-H., BARTHELMES, F., KÖNIG, R., FÖRSTE, CH., BALMINO, G., BIANCALE, R., LEMOINE, J.-M., LOYER, S., BRUINSMA, S., PEROSANZ, F., FAYARD, T.: The CHAMP-only Earth Gravity Field Model EIGEN-2. *Advances in Space Research* 31(8), 1883-1888, 2003 (doi: 10.1016/S0273-1177(03)00162-5)

RIBAMAR, J.L.B. Atividades gravimétricas da ANP. [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por José Ribamar Lopes Bezerra, Coordenador do BDEP / BNDG, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, <jbezerra@anp.gov.br>. Em 18 ago. 2015.

RIGOTI, A. et al. Proposta do comitê de aerogeofísica ao fórum para o desenvolvimento de métodos para a exploração mineral na Amazônia. *Brazilian Journal of Geophysics*, Ano 2, n 18, p. 215-228, 2000.

ROSIER, F.A. Medidas diferenciais da gravidade: ajustamento de uma subrede de estações gravimétricas e determinação de coeficientes de escala para os gravímetros La Coste & Romberg modelo G nº 41, 372 e 454. Curitiba, 1979. 190 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

SANDWELL, D.T.; MULLER, R.D.; SMITH, W.H. F.; GARCIA, E.; FRANCIS, R.. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, American Association for the Advancement of Science, ano 65, nº 346, p. 65-67, dez. 2014. Disponível em:

<<http://topex.ucsd.edu/sandwell/publications/154.pdf>> Acesso em: 11 abr. 2015.

SANTOS JUNIOR, G. Rede gravimétrica: novas perspectivas de ajustamento, análise de qualidade e integração de dados gravimétricos. Curitiba, 2005. 172 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/2577>>. Acesso em: 13 jun 2015.

SCHWINTZER, P.; REIGBER, C. The contribution of GPS flight receivers to global gravity field recovery. *Journal of Global Positioning Systems*, v.1, n.1, 2002. Disponível em:

<http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=206>. Acesso em: 20 jun. 2015.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS. SIRGAS. Boletín Informativo Nro 8. Febrero de 2005. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/bol\\_008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pdf/bol_008.pdf)>. Acesso em: 09 maio 2015.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS. SIRGAS. Presentación. 2015. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/index.php?id=64>>. Acesso em: 09 maio 2015.

SOUSA, M.A. Atividades gravimétricas do ON. [mensagem pessoal]. Mensagem enviada por Mauro Andrade de Sousa, Coordenação de Geofísica, Observatório Nacional. <mauro@on.br>. Em 30 maio 2015.

THOMAS, P. D. Background on Geodetic Principles and Theories. In: FIRST MARINE GEODESY SYMPOSIUM, 1966, Columbus. Proceedings... Columbus: Battelle Memorial Institute. 1966. p. 9-26. Disponível em: <<https://archive.org/stream/proceedingsoffir00mar/page/22/mode/2up>> Acesso em: 01 ago. 2015.

TORGE, W. Gravimetry. New York, USA: Ed. Walter de Gruyter. 1989. 453 p.

TORGE, W. Geodesy. 3. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. xv, 416 p.

TORGE, W.; TIMMEN, L.; RÖDER, R.H.; SCHNÜLL, M. Large Scale Absolute Gravity Control in South America – JILAG-3 Campaigns 1988-1991. Report The IFE Absolut Gravity

Program “South America” 1988-1991, 45 f.  
München, 1994.

TRABANCO, J.L.A. Ajustamento e  
homogeneização de redes gravimétricas  
fundamentais regionais. São Paulo, 1995. 109 p.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola  
Politécnica, Universidade de São Paulo.

## **APÊNDICE 2**

### **A DISTRIBUIÇÃO DA REDE GRAVIMÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO HUMANO NACIONAL**

## **A DISTRIBUIÇÃO DA REDE GRAVIMÉTRICA E O DESENVOLVIMENTO HUMANO NACIONAL**

Carlos Alberto Correa e Castro Júnior <sup>1</sup>

Gabriel do Nascimento Guimarães <sup>2</sup>

Nilson Clementino Ferreira <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Goiás

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB/UFG)

correaecastrojr@gmail.com; nclferreira@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia

Instituto de Geografia

gabriel@ufu.br

### **Resumo**

No Brasil e em vários outros países, é possível observar o relacionamento espacial entre o nível de ocupação do uso do solo e a infraestrutura instalada. Partindo-se do pressuposto de que as redes geodésicas servem de infraestrutura para a instalação de outras infraestruturas, tem-se a hipótese de que a configuração espacial atual da rede gravimétrica brasileira está correlacionada ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) no Brasil. Para avaliar essa hipótese, consideraram-se como unidades espaciais de análise as mesorregiões brasileiras, juntamente com a grade de anomalias gravimétricas que contêm células com, pelo menos, um ponto gravimétrico. Os resultados obtidos mostraram uma relação positiva entre a cobertura gravimétrica e o IDH nas mesorregiões. Com esse arcabouço gravimétrico e a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), procedeu-se à validação do último modelo nacional de ondulações geoidais, o MAPGEO2015. Em decorrência, constatou-se que há uma cobertura de 68,88% do território brasileiro em que o MAPGEO2015 está devidamente validado, onde estão localizados 94,05% dos municípios e residem 89,72% da população nacional. A porção do modelo geoidal não validada está localizada na região centro-noroeste da Amazônia Legal Brasileira, para a qual há o planejamento da implantação de algumas usinas hidrelétricas que podem impactar, além da biodiversidade, terras indígenas, unidades de conservação e até áreas fronteiriças. Sendo assim, para que haja a viabilização de um novo modelo geoidal com validação de abrangência nacional, faz-se necessário um criterioso adensamento gravimétrico, além de melhorias na estruturação da RAAP naquela região.

**Palavras-Chave:** Gravimetria, IDH, Fronteiras

**Abstract**

In Brazil and many other countries, it is possible to observe the spatial correlation between the level of soil occupation and installed infrastructure. Assuming that the geodetic network serves as an infrastructure for the installation of other infrastructures, there is the hypothesis that the current spatial configuration of the Brazilian gravimetric network is correlated to the Human Development Index (HDI) in Brazil. To test this hypothesis, the spatial units of analysis were considered as the Brazilian mesoregions, along with the gravimetric anomalies network that have cells with, at least, one gravimetric point. The results achieved show a positive relation between the gravimetric coverage and the HDI in the mesoregions. With this gravimetric framework and the High Precision Altimetric Network (RAAP) the validation of the last national geoid model, the MAPGEO2015, was executed. As a result, there is a coverage of 68.88% of the Brazilian territory where the MAPGEO2015 is properly validated, where are located 94.05% of the counties and where 89.72% of the national population lives. The portion of the not validated geoid model is located in the center-norwest of the Legal Brazilian Amazon, to where there are plans of implementation of some hydroelectric plants that may impact, besides the biodiversity, indigenous lands, units of conservation and even border areas. Therefore, to allow the feasibility of a new validated geoid model in national scope, a careful gravimetric densification is needed, as well as improvements in the structuring of RAAP in that region.

**Keywords:** Gravimetry, HDI, Borders

## 1 INTRODUÇÃO

O território brasileiro foi povoado desde o litoral para o interior. Esse processo de ocupação recebeu o nome de expansão de fronteiras, por ser caracterizado por distintas frentes (VELHO 1972; MARTINS 1996).

Vários autores explicam os modelos de ocupação do território nacional, caracterizado por diferentes frentes. Miziara (2000, 2006) elaborou um teórico que unifica as frentes de ocupação em três momentos, tradicionalmente identificados com a expansão das fronteiras, sendo eles a frente de expansão, a frente pioneira e a fronteira agrícola. Esses momentos de ocupação consideram os atributos naturais da terra (relevo, tipo de solo, clima, localização, entre outros) e os resultados dos investimentos tecnológicos (retirada da cobertura vegetal nativa, manejo dos solos, aplicação de insumos orgânicos e químicos, formação de áreas de pastagens e áreas agrícolas, dentre outros) (MARX, 1984).

Na ocupação de um território, com o passar do tempo, os investimentos públicos e privados em infraestrutura de transporte, energia e saneamento tendem a aumentar, influenciando no preço da terra que, por sua vez, capacitam gradativamente o território para receber mais investimentos (FERREIRA, et al., 2007). Em alguns casos, conforme os interesses políticos, administrativos, sociais e econômicos, o espaço geográfico pode ser novamente modificado com a ocorrência de processos de urbanização, que podem resultar em novos núcleos populacionais, ou mesmo na expansão de núcleos populacionais previamente existentes (SOUZA, 1995). Dessa forma, após a fronteira agrícola, normalmente ocorre mais uma etapa da construção do espaço geográfico, que é a consolidação da ocupação por meio da implantação de infraestruturas e de urbanização.

A construção e transformações do espaço geográfico devem ser planejadas e mensuradas, a fim de possibilitar um conhecimento acurado e preciso dos custos e benefícios (econômicos, ambientais e sociais) dessas transformações. Além disso, as implementações de tais transformações necessitam ser apoiadas em mapeamentos de alta qualidade. Tais mapeamentos devem considerar um único sistema de referência geodésico, de tal forma que as alterações do espaço geográfico e as obras de infraestrutura sejam devidamente executadas, conforme o planejamento. Destarte os impactos previamente mencionados poderiam ser eficientemente monitorados, minimizando a possibilidade de ocorrência de prejuízos ao ambiente, à sociedade e à economia (PINTO, 2000).

Um sistema de referência geodésico é materializado no espaço geográfico por meio de redes de pontos de coordenadas mensuradas em campo, considerando um modelo matemático que represente a superfície da Terra (SILVA et al., 2008). A correta utilização de um sistema de referência pode minimizar inconveniências na implantação de infraestruturas e na ocupação do espaço geográfico, evitando-se também a ocorrência de riscos de inundações, alagamentos, movimentos de massas de terra, entre outros problemas correlatos. Sendo assim, um sistema de referência geodésico se constitui em necessária infraestrutura para a implantação de outras infraestruturas de engenharia, além de subsidiar a ocupação do espaço geográfico.

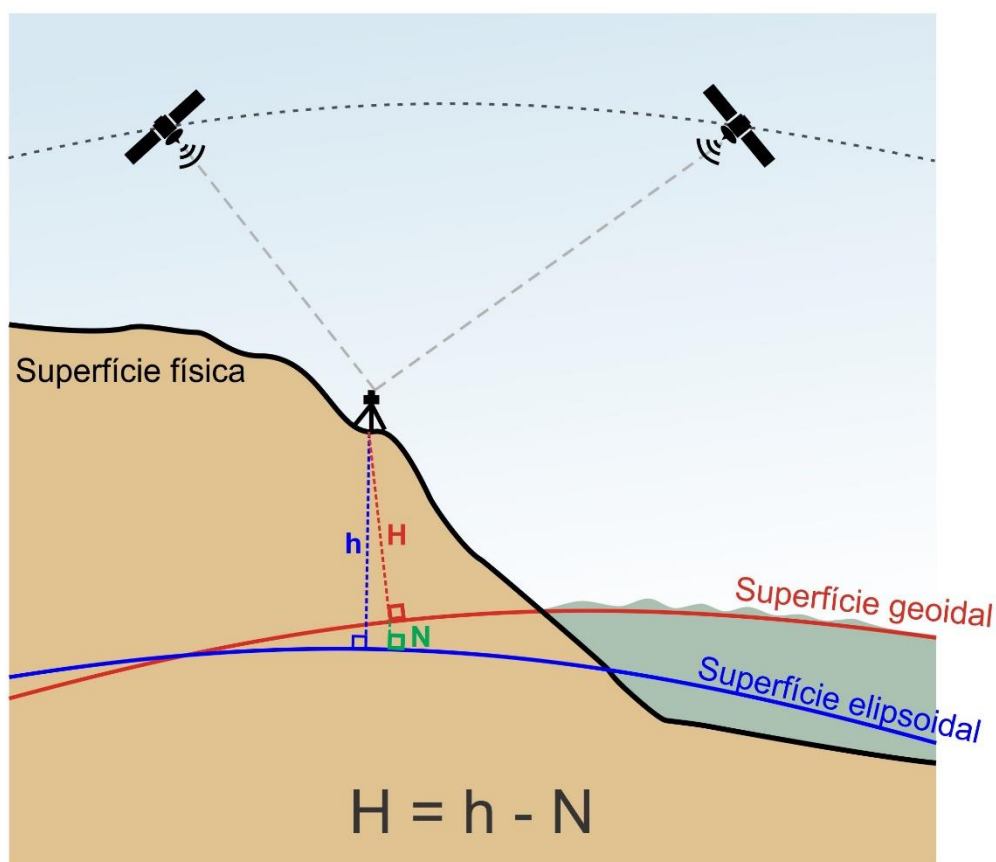
No Brasil, a infraestrutura geodésica é materializada essencialmente por uma rede planimétrica (cuja denominação recente está sendo alterada para rede planialtimétrica), uma rede altimétrica e uma rede gravimétrica, que atualmente consideram as variações temporais. Esse conjunto de redes é denominado de Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (IBGE, 1999). Em que pesem iniciativas pioneiras promovidas por instituições assemelhadas, com atividades nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, coube ao IBGE à missão de propiciar o arcabouço geodésico com abrangência nacional. Tais incumbências atualmente são traduzidas pela gestão, implantação e manutenção do SGB, de acordo com o disposto originalmente no Cap. VIII do Decreto-Lei n.º 243, de 28 de fevereiro de 1967.

É possível afiançar então que a trajetória da Geodesia brasileira está atrelada ao longo caminho percorrido pelo IBGE desde o final da década de 1930. Contudo, no decorrer de todos esses anos o IBGE não atuou sozinho na gestão do SGB. Diversas parcerias foram celebradas possibilitando conquistas maiúsculas para as atividades geodésicas nacionais e permitindo aportes significativos que têm ajudado ao IBGE a cumprir a sua missão institucional concernente ao SGB.

O planejamento e a execução de obras de infraestrutura dependem de precisão, acurácia e rapidez no posicionamento geodésico. Atualmente, adotam-se receptores vinculados aos Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS, *Global Navigation Satellite System*), que possibilitam o posicionamento tridimensional a qualquer momento, com rapidez, precisão e acurácia, conforme as características dos equipamentos receptores e técnicas empregadas. No entanto, os dados altimétricos obtidos por meio desses equipamentos necessitam de correções adequadas, pois os mesmos não consideram o campo de gravidade do planeta, que tem como referência a superfície geoidal (SILVA e SEGANTINI, 2015).

Tais correções são efetuadas através das ondulações ou alturas geoidais, e permitem transportar as altitudes geodésicas, desde a superfície elipsoidal que referencia o GNSS, para a superfície geoidal, que serve de referência às altitudes denominadas de altitudes ortométricas. As ondulações geoidais são obtidas por meio de modelagem matemática, a partir de dados de levantamentos gravimétricos que utilizam uma abordagem física. A Figura 1 elucida melhor a questão.

**Figura 1** – Transformação de altitude geodésica (h) em altitude ortométrica (H) através da ondulação geoidal (N)



Fonte: O autor

Os métodos gravimétricos baseiam-se na comparação da aceleração de gravidade, medida na superfície física da Terra (nos continentes ou nos oceanos), com a gravidade normal correspondente (CASACA, 2013). Para se realizar a modelagem das ondulações geoidais utilizando-se esses métodos é necessário contar com uma rede de pontos gravimétricos, ou estações gravimétricas (EEGG), com densa e homogênea cobertura espacial em todo o território a ser modelado.

Após a modelagem das ondulações geoidais, é necessário realizar a validação do modelo; para tanto se utilizam pontos da RAAP (BLITZKOW et al., 2016). A maneira usual de se avaliar a qualidade de um modelo geoidal gravimétrico está correlacionada com a comparação das ondulações geoidais oriundas do modelo e aquelas obtidas diretamente pelas diferenças entre as altitudes geodésicas, advindas de receptores GNSS, com as altitudes ortométricas fornecidas por estações altimétricas da RAAP. Assim, para se calcular um modelo de ondulações geoidais confiável, são necessárias duas redes que integram o SGB, a rede gravimétrica e a RAAP, que é construída por meio de nivelamento geométrico.

À parte de todo apoio científico, tecnológico e operacional que a área de Geodesia do IBGE vem disponibilizando à sociedade no decorrer de sua existência, diversas lacunas ainda existem no arcabouço geodésico nacional. As limitações impostas pelas características físicas de algumas regiões do Brasil fizeram com que a distribuição da infraestrutura geodésica no território nacional fosse heterogênea e não atendesse de forma equitativa às necessidades demandadas pela sociedade.

A existência da possível relação entre o estágio de ocupação do território nacional com a infraestrutura geodésica implantada remete este trabalho a investigar o relacionamento entre a atual ocupação territorial com a cobertura espacial da rede gravimétrica brasileira. A hipótese testada neste trabalho é de que as regiões mais desenvolvidas do Brasil possuem maiores coberturas da rede gravimétrica. Sendo assim, nessas regiões a rede gravimétrica atua como infraestrutura das infraestruturas de engenharia. Em contrapartida, nas regiões brasileiras menos desenvolvidas, em que ainda não há essa infraestrutura geodésica disponível, a execução de grandes obras de engenharia depende previamente de levantamentos gravimétricos para serem planejadas, licenciadas e executadas.

Este trabalho pretende evidenciar a desigual distribuição das EEGG nacionais, a partir da correlação entre a cobertura gravimétrica e o IDH das mesorregiões brasileiras, apontando as regiões com arcabouços gravimétricos mais densos e os vazios gravimétricos ainda existentes no Brasil.

## **2 METODOLOGIA**

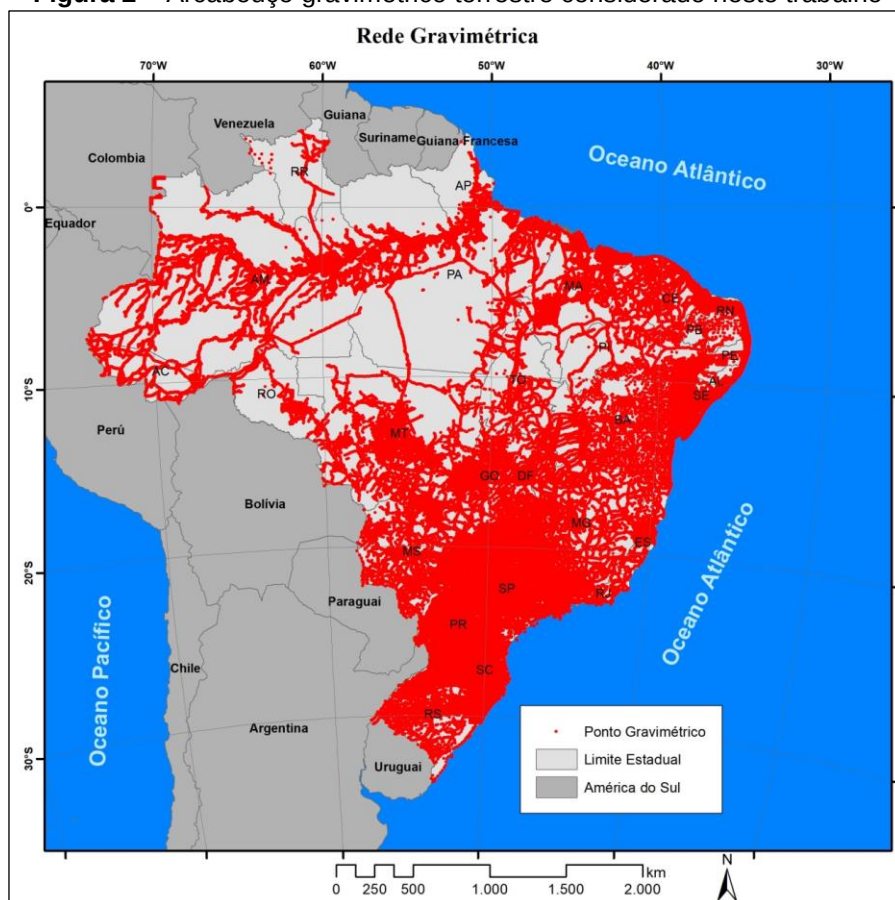
A elaboração deste trabalho considerou toda a região continental do Brasil, uma área aproximada de 8,5 milhões de km<sup>2</sup>. Segundo o censo demográfico de 2010, a população residente no Brasil era de 196,8 milhões de habitantes (IBGE, 2010). O

Brasil é dividido em cinco regiões que se subdividem em 27 unidades federativas. Estas, por sua vez, são divididas em 137 mesorregiões, 558 microrregiões e 5570 municípios.

Para as análises empreendidas foi considerado o conjunto de estações gravimétricas terrestres implantadas no Brasil por diversas instituições, tais como IBGE, USP e Petrobras. Devido aos levantamentos de prospecção petrolífera, as regiões norte e nordeste possuem maiores quantidades de EEGG. No entanto esses pontos estão altamente concentrados em locais específicos de interesse da Petrobrás, fazendo com que grandes áreas daquelas regiões estejam sem informações gravimétricas terrestres (BLITZKOW et al., 2016).

O número de EEGG levantadas no Brasil e consideradas neste trabalho é de 450.589. Essas mesmas estações foram originalmente utilizadas no cálculo do MAPGEO2015, e suas coordenadas foram disponibilizadas pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). A distribuição desse arcabouço gravimétrico pode ser observada na Figura 2.

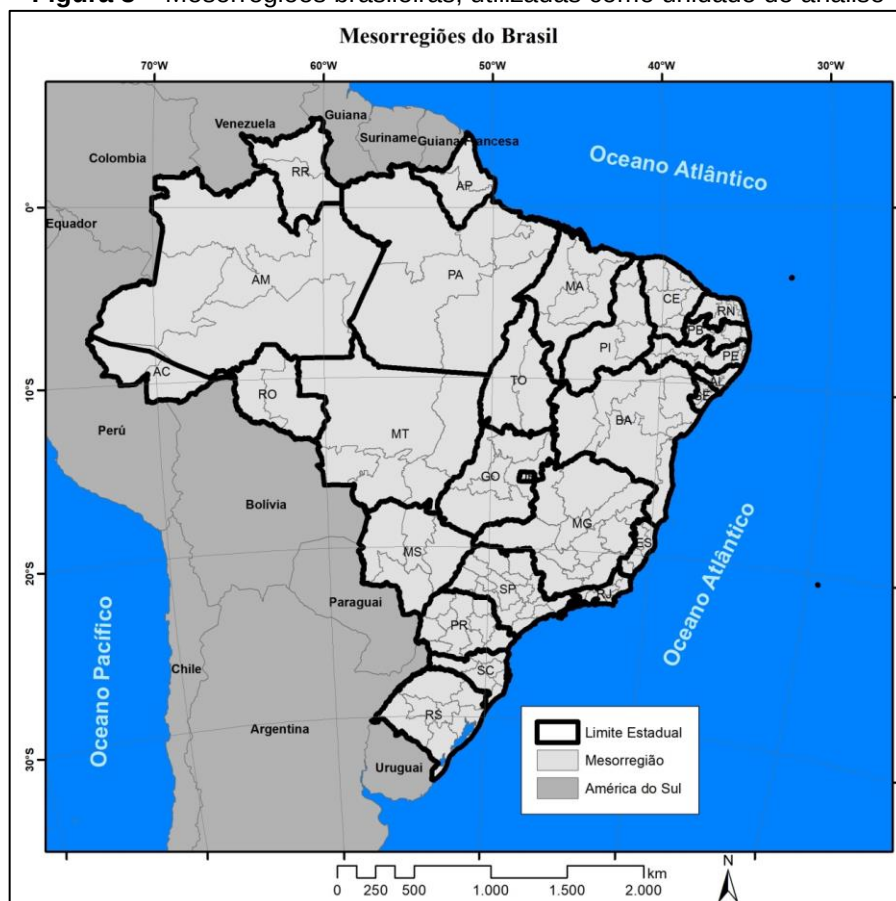
**Figura 2** – Arcabouço gravimétrico terrestre considerado neste trabalho



Fonte: O autor

Para as análises espaciais elaboradas no âmbito deste trabalho, optou-se por utilizar como unidade territorial as mesorregiões brasileiras. Esse recorte permitiu uma considerável quantidade de unidades territoriais de análise, abarcando inclusive unidades com expressivas dimensões territoriais. Na Figura 3 é possível observar o mapa das mesorregiões do Brasil.

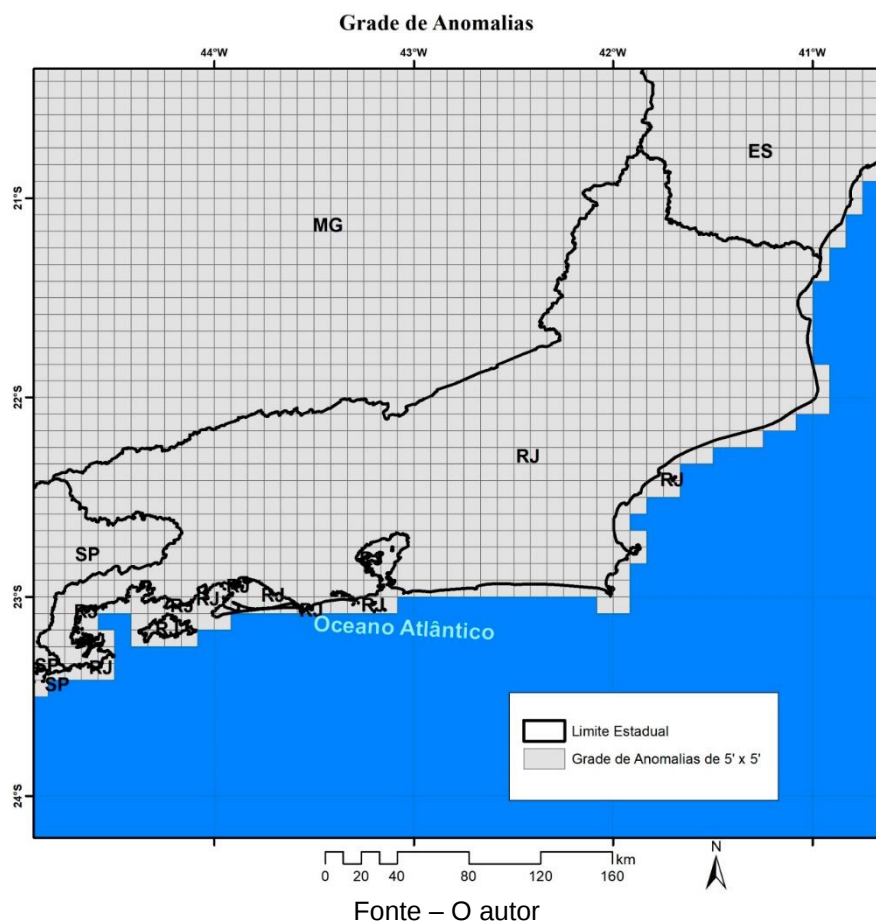
**Figura 3 – Mesorregiões brasileiras, utilizadas como unidade de análise**



Fonte – O autor

Outra unidade territorial utilizada nas análises empreendidas foi a grade de anomalias com resolução espacial de 5' por 5' de arco de longitude e latitude. Grade similar também foi utilizado na determinação do MAPGEO2015. Uma situação ideal para a elaboração de um modelo gravimétrico de ondulações geoidais seria a de se ter, pelo menos, um ponto gravimétrico em cada célula da grade de anomalias. A título de exemplo, a Figura 4 ilustra a porção da grade de anomalias de 5' por 5' de resolução espacial para parte da região sudeste brasileira.

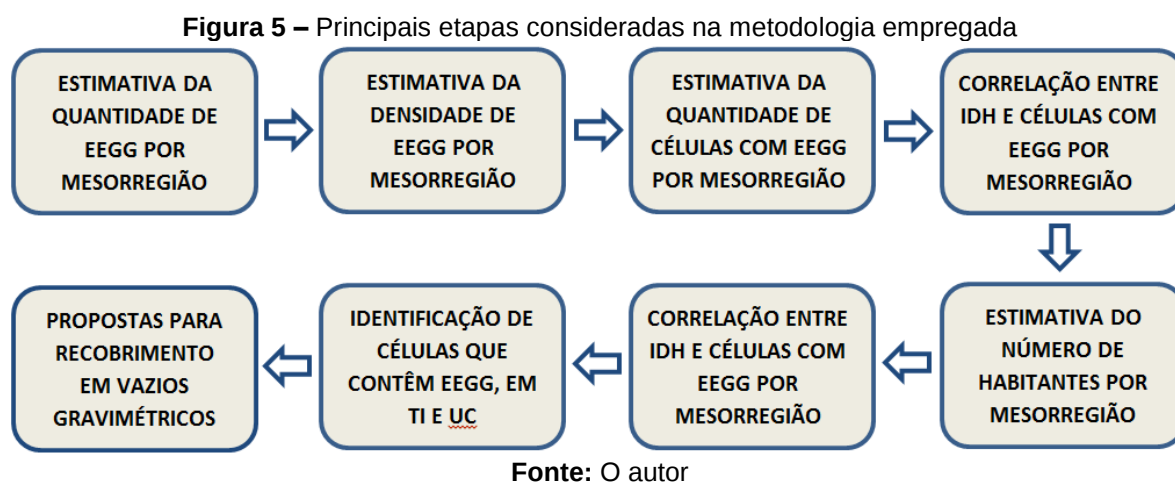
**Figura 4** – Exemplo de grade de anomalias gravimétricas, utilizada na modelagem do MAPGEO2015



Foram considerados também os mapeamentos de áreas especiais, tais como Unidades de Conservação (UC) e Terras Indígenas (TI), onde geralmente não são realizados levantamentos gravimétricos terrestres e possuem escassa cobertura gravimétrica. Nas regiões brasileiras localizadas mais ao sul e também na faixa litorânea existem poucas dessas áreas. Entretanto, na região Norte e na porção central do Brasil, há uma maior ocorrência dessas áreas especiais, praticamente desprovidas de cobertura gravimétrica terrestre.

Na metodologia empregada analisou-se, inicialmente, a quantidade e densidade de pontos gravimétricos por mesorregião. Posteriormente foram evidenciadas quais células da grade de anomalias gravimétricas que possuíam pelo menos um ponto de levantamento gravimétrico. O próximo passo foi verificar a cobertura espacial dessas células com alguma EG nas mesorregiões brasileiras, considerando também a quantidade de população atendida, com base no mapa de setores censitários de 2010. Posteriormente, foi avaliada a correlação estatística entre o IDH médio e a cobertura gravimétrica existente em cada mesorregião. Finalmente,

foram inventariadas as células da grade de anomalia gravimétrica nas UCs e TIs, objetivando apresentar propostas para as áreas sem cobertura gravimétrica no Brasil. O fluxograma contido na Figura 5 sintetiza a metodologia aplicada.



A partir de informações a respeito da validação do modelo geoidal de 2015, foi também avaliada a quantidade de população contemplada pelo recorte territorial correspondente ao modelo devidamente validado. Isso permitirá a escolha de áreas prioritárias para a realização de futuros trabalhos de validação do MAPGEO2015, visando obter maior abrangência espacial do mesmo.

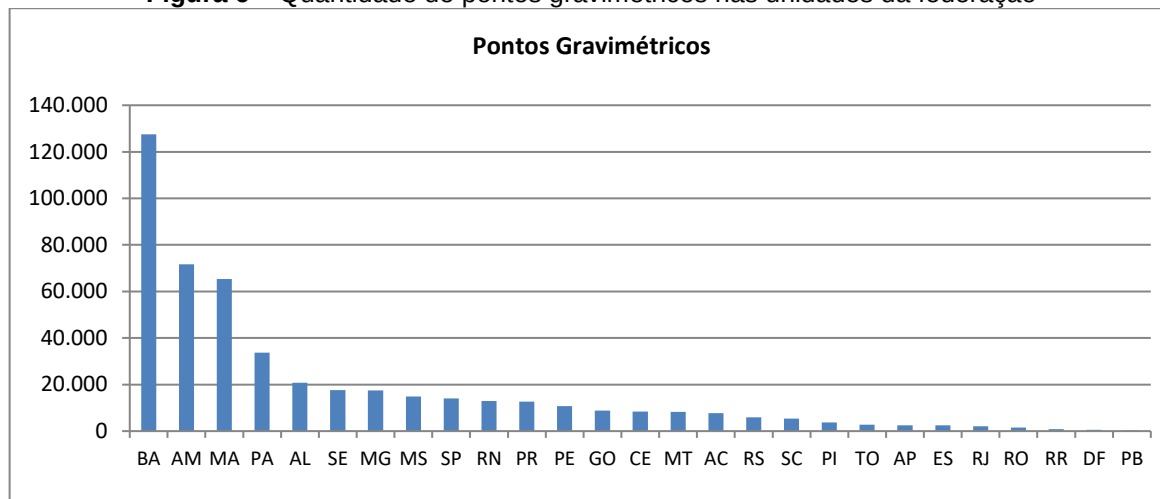
Finalmente, de posse de dados e informações do trabalho de (LATRUBESSE et al., 2017), a respeito de Usinas Hidrelétricas (UHEs) que podem ser implantadas futuramente na Amazônia Legal brasileira, foi realizada uma análise do MAPGEO2015 para a região, apontando quais os possíveis impactos dessas grandes obras em termos de conflitos geopolíticos, ambientais e nas populações silvícolas.

### 3 RESULTADOS

O primeiro resultado auferido retrata a quantidade de EEGG por unidade da federação. Na Figura 6 é possível observar que os estados da Bahia, Amazonas, Maranhão, Pará e Alagoas possuem 66,4% dos pontos gravimétricos brasileiros, enquanto que a Paraíba é o estado com a menor quantidade, apenas 252 EEGG. É importante considerar que, em determinadas unidades da federação, as informações gravimétricas terrestres podem estar concentradas em regiões específicas, ficando muitas áreas com pouquíssima densidade de estações. Blitzkow et al., (2016) afirmaram que, apesar das regiões nordeste e norte possuírem muitos pontos

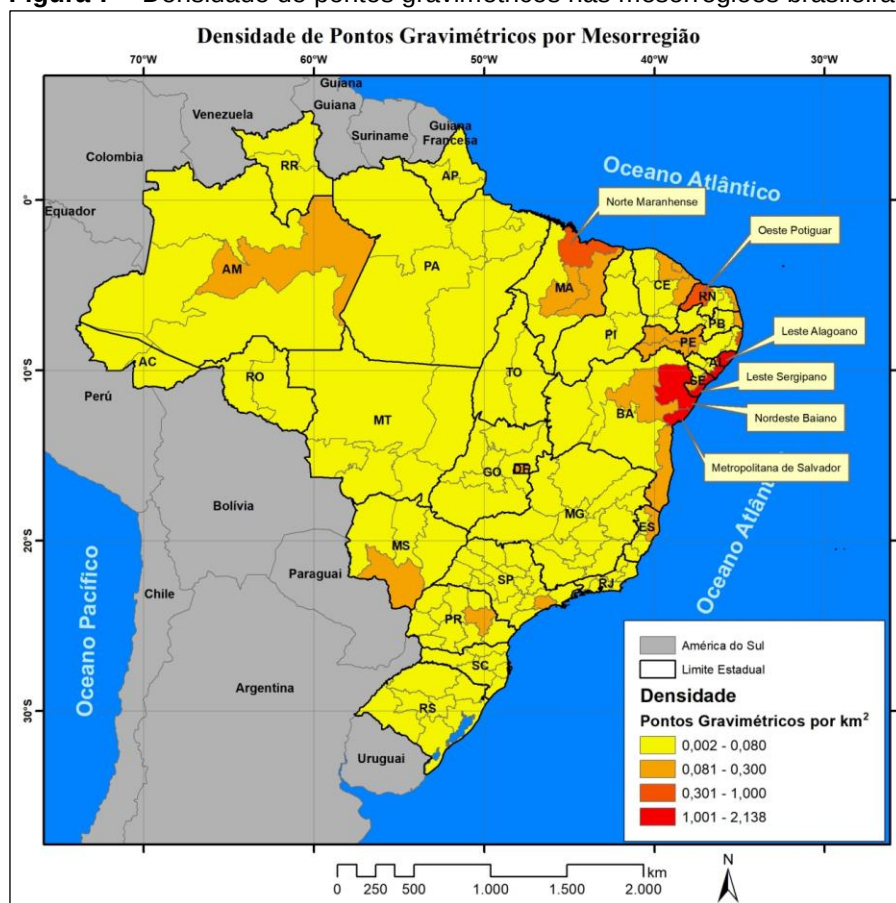
gravimétricos, existem grandes áreas naquelas regiões com carência de cobertura gravimétrica homogênea.

**Figura 6 – Quantidade de pontos gravimétricos nas unidades da federação**



**Fonte:** O autor

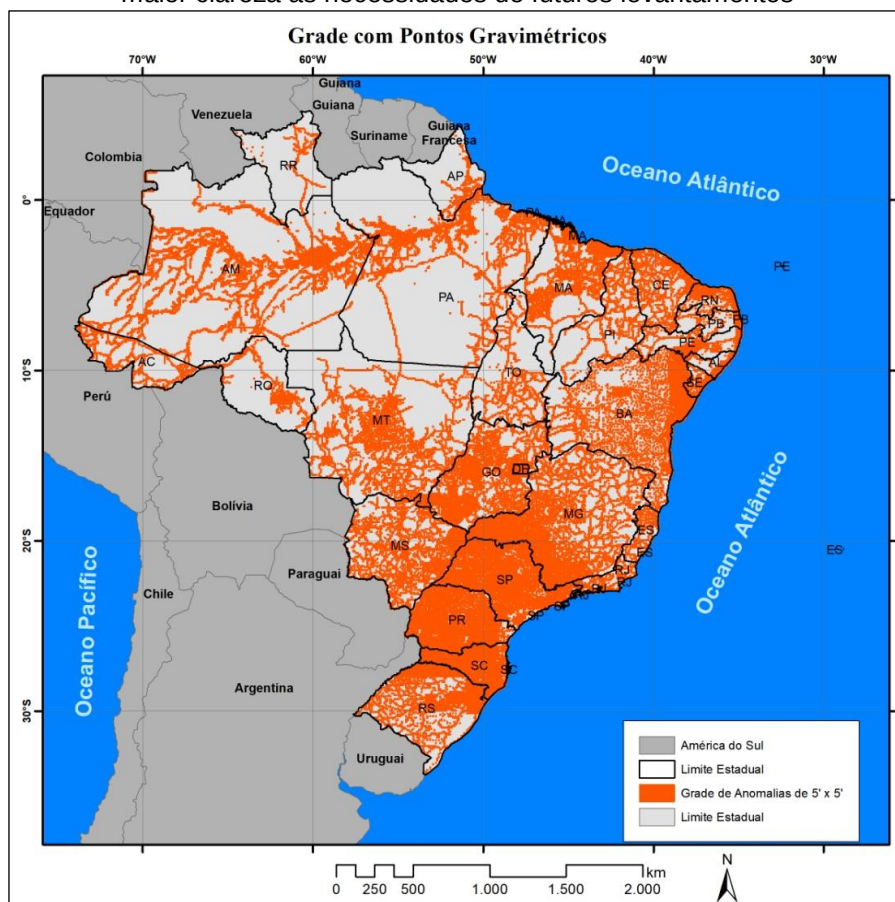
Em seguida foi realizada a análise em relação à distribuição de pontos gravimétricos por mesorregião, considerando a densidade de pontos por km<sup>2</sup>. Observou-se que os locais de maiores densidades gravimétrica estão localizados nas mesorregiões litorâneas do nordeste brasileiro, mais especificamente no Norte Maranhense, Oeste Potiguar, Leste Alagoano, Leste Sergipano, Nordeste Baiano e na região Metropolitana de Salvador. A grande densidade de cobertura gravimétrica naquelas áreas se deve aos trabalhos de prospecção executados pela Petrobras. A prospecção geofísica também foi determinante na densidade de pontos gravimétricos do Centro Amazonense. Além dessas regiões, foram destacadas outras mesorregiões no estado de São Paulo (região Metropolitana de São Paulo), no estado do Paraná (Centro Oriental Paranaense), Mato Grosso do Sul (Sudoeste de Mato Grosso do Sul) e o Distrito Federal (Figura 7).

**Figura 7 – Densidade de pontos gravimétricos nas mesorregiões brasileiras**

Fonte – O autor

Os últimos modelos geoidais brasileiros da série MAPGEO possuem resolução espacial de 5' na longitude e na latitude (BLITZKOW et al., 2016). Portanto, o ideal seria que a cobertura gravimétrica no Brasil ocorresse de tal forma que, em cada célula de 5' por 5', estivesse presente pelo menos uma EG. Após a elaboração da grade de anomalias gravimétricas, cobrindo todo o território nacional com 103.739 células, utilizou-se um programa computacional de sistema de informações geográficas para selecionar as células onde existe pelo menos um ponto gravimétrico. Dessa análise resultaram 38184 células que contêm informações gravimétricas terrestres, ou seja, 36,81% do território brasileiro. Em contrapartida, 63,19% da área territorial brasileira não dispõem de arcabouço gravimétrico terrestre, considerando a distribuição em grid de 5' x 5'. A Figura 8 mostra essa subdivisão em grades de anomalias para todo o Brasil.

**Figura 8** – Distribuição da grade que possui pelo menos um ponto gravimétrico. Embora haja semelhança com a Figura (1), que retrata o arcabouço gravimétrico pontual brasileiro, em função da escala, a subdivisão em quadrículas permite identificar melhor os vazios gravimétricos e apontar com maior clareza as necessidades de futuros levantamentos

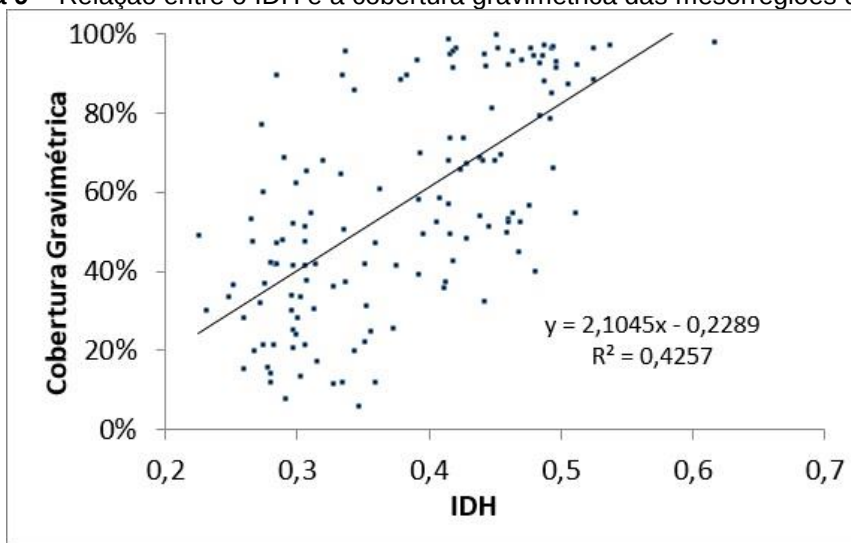


Fonte: O autor

Pela Figura 8 é possível observar também que os estados das regiões sul e sudeste do Brasil possuem uma boa cobertura de grades que possuem EEGG. A cobertura diminui de maneira expressiva nos estados da região Norte e também em algumas áreas de dimensões notáveis no interior da região Nordeste.

Com o intuito de analisar a relação entre a cobertura da grade de anomalias gravimétricas e o IDH nas mesorregiões brasileiras, foi elaborado o gráfico de dispersão que pode ser observado na Figura 9. Apesar de o mesmo apresentar uma expressiva dispersão, é possível notar que há uma tendência de correlação positiva entre a cobertura gravimétrica e o IDH nas mesorregiões brasileiras. Geralmente, os locais com maiores IDH são mais urbanizados, possuindo infraestrutura de energia, saneamento básico, transporte, entre outras facilidades disponíveis e, adicionalmente, maior cobertura gravimétrica.

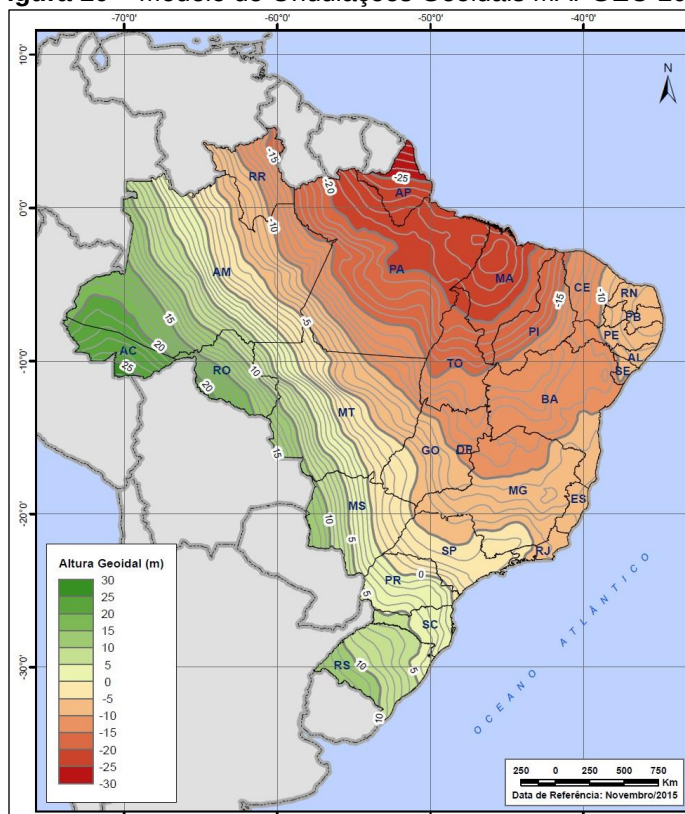
**Figura 9** – Relação entre o IDH e a cobertura gravimétrica das mesorregiões do Brasil



Fonte: O autor

Conforme menção anterior, a mesma cobertura gravimétrica avaliada neste trabalho serviu de referência à última versão do modelo de ondulações geoidais para o Brasil, o MAPGEO2015. Na Figura 10 é possível observar as alturas ou ondulações entre a superfície geoidal de referência e a superfície elipsoidal do *datum* SIRGAS 2000, em todo o território nacional.

**Figura 10** – Modelo de Ondulações Geoidais MAPGEO 2015



Fonte: Blitzkow et al., (2016)

O modelo MAPGEO2015 foi validado utilizando-se 592 Referências de Nível (RRNN) distribuídas em uma grande porção do território brasileiro (BLITZKOW et al., 2016). Na Figura 11 é possível observar que as discrepâncias entre as conexões GNSS e as RRNN tiveram valor máximo de 0,50 metros. A área validada corresponde a 5855 milhões de km<sup>2</sup> (68,88% do território brasileiro), atinge 5239 municípios (94,05% dos municípios) e atende a 89,72% da população brasileira.

**Figura 11** – Região onde o modelo de ondulações geoidais foi validado

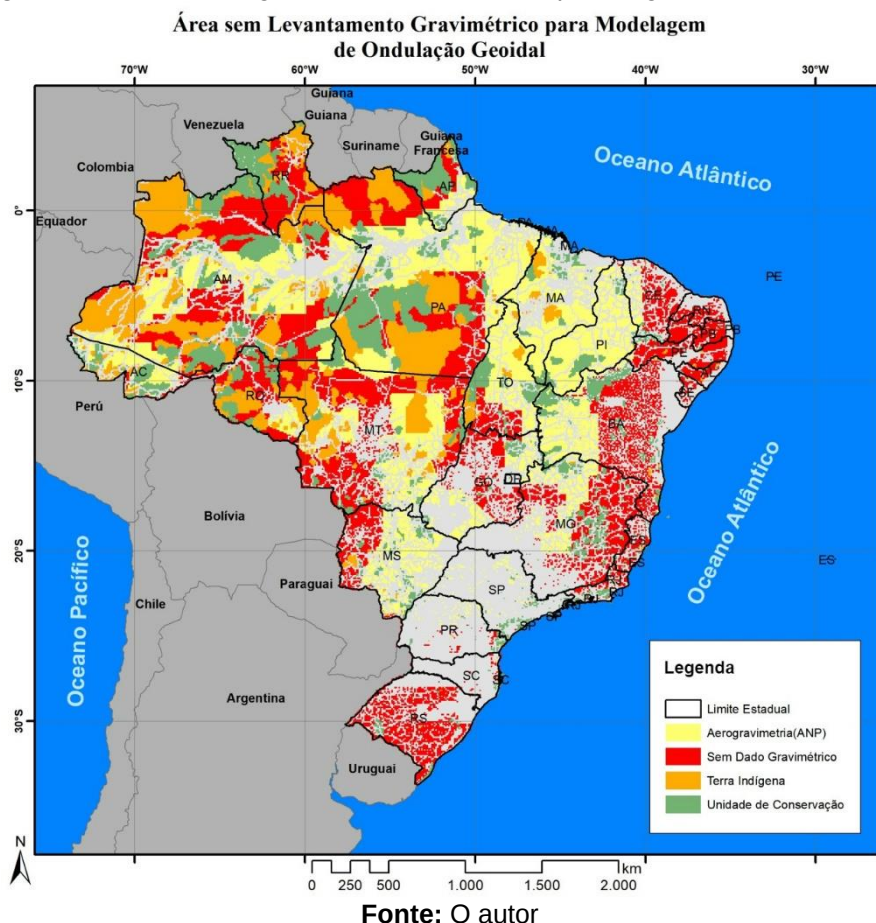


**Fonte:** Blitzkow et al., (2016)

Considerando no Brasil as células de 5' por 5' que não possuem EG e que, portanto, não puderam contribuir diretamente na modelagem de ondulações geoidais, foi possível elaborar a Figura 12. É importante esclarecer que uma expressiva porção dessas células possuem dados gravimétricos obtidos por mensurações aéreas (aerogravimetria), com fins específicos de prospecção geofísica, cujo acervo pertence à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Esses dados ainda não foram considerados na elaboração de modelos geoidais nacionais, mas

estão passando por um processo de validação na EPUSP com vistas a um possível aproveitamento futuro.

**Figura 12** – Células da grade de anomalias sem pontos gravimétricos terrestres

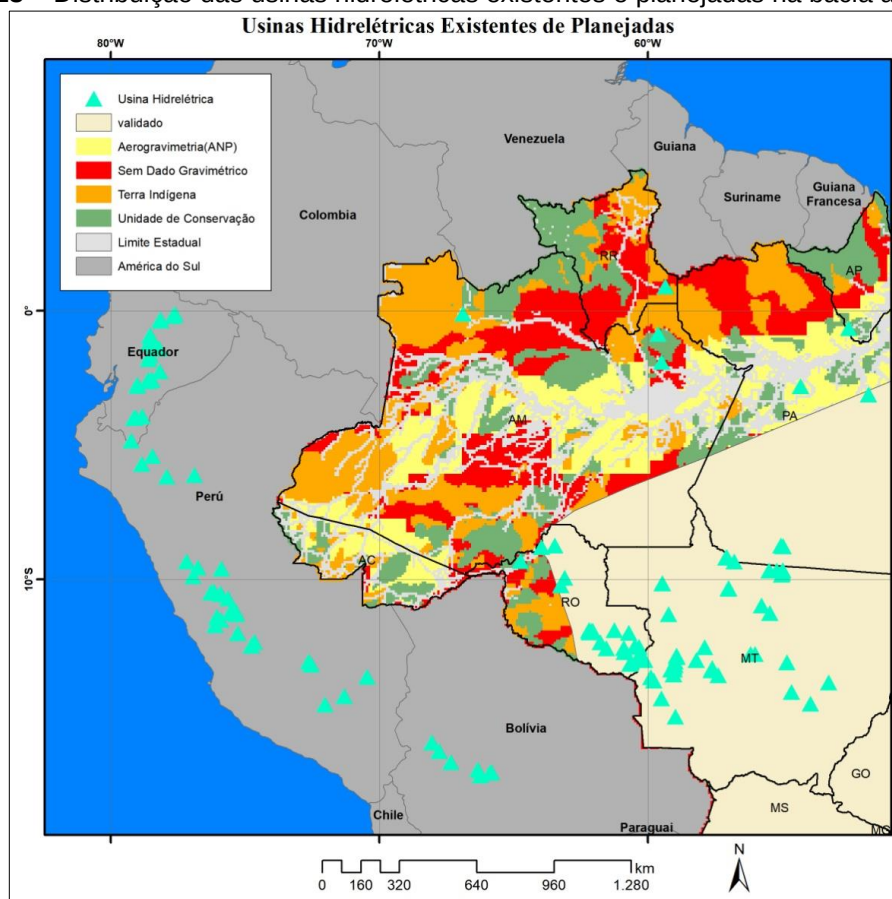


Cabe observar que muitas áreas vazias de gravimetria são ocupadas por terras indígenas ou unidades de conservação da biodiversidade. O acesso a essas áreas normalmente é difícil e requer autorizações das instituições mantenedoras ou fiscalizadoras. Há também regiões que não são protegidas e não possuem qualquer tipo de dado gravimétrico. Grande parte desses vazios gravimétricos possui restrições de trafegabilidade, dificultando a adoção de soluções triviais que envolvam levantamentos gravimétricos terrestres.

Complementando, vale salientar que 44,7% das áreas não cobertas por levantamentos gravimétricos, estão localizadas na porção do território brasileiro que não possui validação para o MAPGEO2015. Latrubesse et al., (2017) mencionaram 431 UHEs existentes e planejadas na bacia amazônica, sendo algumas delas localizadas no Brasil e outras nos demais países amazônicos (Figura 13). Sendo

assim, torna-se relevante discutir com os países que fazem parte da bacia amazônica, alternativas geodésicas conjuntas para minimizar os impactos ambientais e socioeconômicos.

**Figura 13** – Distribuição das usinas hidrelétricas existentes e planejadas na bacia amazônica



Fonte: O autor

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais, com grandes áreas de difícil acesso e de alta vulnerabilidade ambiental, ainda não possui uma abrangência gravimétrica integral. No entanto, os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram que a cobertura espacial da rede gravimétrica apresenta relação estatística com o desenvolvimento humano brasileiro. Além disso, 89,05% da população brasileira residem em locais onde o atual modelo de ondulações geoidais está validado.

Por outro lado, apesar dos esforços institucionais na realização de levantamentos gravimétricos, ainda é expressiva a quantidade de áreas no Brasil sem cobertura gravimétrica e que também não têm validação para o atual modelo de ondulações geoidais. Essa falta de validação é explicada, principalmente, pela

carência de RRNN confiáveis da RAAP. As áreas sem validação ocorrem em porções importantes da Amazônia Legal Brasileira, onde já existem implantadas algumas UHEs e se planeja a construção de novos aproveitamentos hidrelétricos.

Vários países sul americanos localizados na bacia amazônica também planejam construir UHEs. Tal peculiaridade sugere que essas nações vizinhas busquem alternativas eficazes para contemplar a região com cobertura gravimétrica, considerando a possibilidade de que sejam aproveitados os levantamentos aerogravimétricos e satelitais. Em paralelo, recomenda-se que os países amazônicos promovam prioritariamente o adensamento das correspondentes redes gravimétricas, bem como a expansão e conexões das respectivas Redes Altimétricas Nacionais, visando alcançar um consistente Sistema Vertical de Referência naquela região.

## 5 REFERÊNCIAS

BLITZKOW, D.; MATOS, A.C.C.; MACHADO, V.C.; NUNES, M.A.; LENG RUBER, N.V.; XAVIER, E.M.L.; FORTES, L.P.S. MAPGEO2015: O Novo Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 68, n. 10, p. 1873–1884, 2016.

CASACA, J.M.; MATOS, J.L.; DIAS, J.M.B. **Topografia Geral**. 4.ed.; Tradução Luiz Felipe Coutinho Ferreira da Silva, Douglas Corbari Corrêa. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2013. 208 p.

FERREIRA, N. C.; MIZIARA, F.; RIBEIRO, N. V. Preço da terra em Goiás: pressupostos e modelos. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 27, n. 1 (47-62), 2007.

IBGE. **Censo Demográfico de 2010 - Características da população e dos domicílios: resultados do universo Rio de Janeiro**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas\\_da\\_populacao/resultados\\_do\\_universo.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/resultados_do_universo.pdf)>. Acesso em: mar. 2017.

IBGE. **Noções Básicas de Cartografia**. Rio do Janeiro. 130p. 1999

LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E.Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BAKER, V.R.; D'HORTA, F.M.; WIGHT, C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; BAKER, P.A.; RIBAS, C.C.; NORGAARD, R.B.; FILIZOLA, N.; ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; STEVAUX, J.C. Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature** 546, 363–369, 15 June 2017. doi:10.1038/nature22333.

MARTINS, J. S. O tempo da fronteira: retorno à controvérsia sobre o tempo histórico da frente de expansão e da frente pioneira. **Tempo Social**, São Paulo, n. 8, p. 25-70, maio 1996.

MARX, K. **O capital: crítica da economia política**. 2. ed. São Paulo: Nova Cultural, 1986.

MIZIARA, F. **Condições estruturais e opção individual na formulação do conceito de fronteira agrícola.** In: SILVA, L. S. D. (Org.). *Relações cidade-campo: Fronteiras.* Goiânia: Ed. da UFG, 2000.

MIZIARA, F. **Expansão de fronteiras e ocupação do espaço no Cerrado: o caso de Goiás.** In: DANIEL, M. A.; DAL LARA, L.; ANACLETO, T.C. S. (Org.). *Natureza Viva: Cerrado.* Goiânia: Ed. da UCG, 2006.

PINTO, J. R. M. **Potencialidade do uso do GPS em obras de Engenharia.** Dissertação (mestrado). UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2000.

SILVA, A.L.; LIMA, M. A. A.; COSTA, S. M. A. **Redes Estaduais GPS: Situação Atual e Perspectiva Futura.** II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, set 2008.

SILVA, I.; SEGANTINI, P. C. L. **Topografia para Engenharia - Teoria e Prática de Geomática.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. v. 1. 412p.

SOUZA, M. A. A. **O novo Brasil urbano: Integração ou fragmentação?** In: GONÇALVES, M. F. *O novo Brasil urbano: impasses, dilemas, perspectivas.* Porto Alegre: Mercado Aberto, 1995. p. 65-71.

VELHO, O. G. **Frentes de expansão e estrutura agrária: estudos do processo de penetração numa área da Transamazônica.** Rio de Janeiro: Zahar, 1972.

### **APÊNDICE 3**

#### **ANÁLISE DE DADOS DA MISSÃO GRACE E DA REDE SIRGAS PARA O MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM GRANDES BACIAS**

## ANÁLISE DE DADOS DA MISSÃO GRACE E DA REDE SIRGAS PARA O MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS DO BRASIL

Carlos Alberto Correa e Castro Júnior<sup>1</sup>; João Paulo Magna Jr<sup>2</sup>; Raul Bini Amaral<sup>3</sup> e Nilson Clementino Ferreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Goiás  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB/UFG)  
correaecastrojr@gmail.com; nclferreira@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG  
Campus Goiânia – Área de Geomática, Goiânia - GO  
joao.paulo@ifg.edu.br

<sup>3</sup> Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária  
Universidade Federal de Goiás – Campus Colemar Natal e Silva  
CEP 74605-220 – Goiânia – GO, Brasil  
e-mail: raulmantra15@gmail.com

**Resumo.** A variação da gravidade terrestre em âmbito global pode ser detectada atualmente por meio de satélites orbitais. No entanto, oscilações altimétricas de pequena magnitude observadas na rede de receptores de posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System), ocorrem devido à variação hidrológica e de gravidade ao longo do tempo. Neste trabalho, verificou-se o nível de relacionamento matemático entre as informações altimétricas de estações da rede SIRGAS e os dados de espessura equivalente de água, em resolução temporal mensal, entre fevereiro de 2011 e dezembro de 2013. Os resultados obtidos mostraram uma significativa relação matemática entre os dois conjuntos de dados para quatro grandes bacias hidrográficas brasileiras.

**Palavras-chave:** GRACE, Rede SIRGAS, GNSS, gravimetria, Geodesia.

**Abstract.** The variation of terrestrial gravity in global scope may be detected nowadays by orbital satellites. However, small-scale altimetric oscillations observed in the GNSS (Global Navigation Satellite System) positioning receiver network occur due to hydrologic and gravity variation over time. In this paper, was verified the level of mathematical relations between the altimetric information of SIRGAS network stations and Equivalent

Water Thickness (EWT) data, in monthly temporal resolution, from February 2011 to December 2013. The obtained results showed a significant mathematical relation between the two data sets for four large Brazilian river basins.

**Key-words:** GRACE, SIRGAS network, GNSS, gravimetry, Geodesy.

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento ambiental em países de dimensões continentais, como o Brasil, é uma atividade onerosa e de grande complexidade. O teor de complexidade aumenta conforme a resolução temporal e a variável ambiental que se deseja monitorar, como é o caso do monitoramento quantitativo de águas subterrâneas, com alta resolução temporal. As análises empreendidas neste trabalho são motivadas pelas grandes quantidades de massas d'água subterrâneas que produzem alterações elásticas na crosta terrestre, modificando as coordenadas altimétricas de estações localizadas na superfície terrestre (MOREIRA, 2016).

A acurácia e rapidez das tecnologias de posicionamento espacial viabilizaram as mensurações dos movimentos e deformações da crosta terrestre devido aos processos da geodinâmica interna do planeta. Tais tecnologias permitem avaliar as variações no posicionamento tridimensional e no campo de gravidade terrestre, além de subsidiar o monitoramento de algumas variáveis ambientais (BEVIS et al., 2005; BOLKAS et al., 2012).

Por meio do atraso na recepção de sinais emitidos por satélites de posicionamento, tem sido possível estimar a quantidade de água disponível na atmosfera (IWV, *Integrated Water Vapor*) e assim aplicar as informações provenientes dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) na meteorologia (MONICO & SAPUCCI, 2003).

A necessidade de se monitorar os processos dinâmicos do planeta Terra, incluindo os deslocamentos das placas litosféricas, demandou avanços que permitissem à Geodesia estar apta a acompanhar convenientemente a ocorrência de tais processos. Dentre esses avanços destaca-se a implantação de uma rede de estações geodésicas ativas, associadas ao referencial geodésico do Sistema de Referência Geocêntrico para

as Américas (SIRGAS). A topologia da rede de monitoramento contínuo SIRGAS, compreende um conjunto de receptores GNSS rastreando continuamente e distribuídos pelos na América Latina e no Caribe, que determinam coordenadas de alta precisão (associadas a uma época de referência específica) e suas variações ao longo do tempo (SIRGAS, 2018).

Os dados advindos dos receptores GNSS são processados semanalmente, fornecendo coordenadas tridimensionais acuradas e velocidade de deslocamento dos pontos sobre os quais estão instalados (CHAVES et al., 2010; SIRGAS, 2018). Atualmente essa rede ativa SIRGAS é denominada SIRGAS-CON. No Brasil, a rede SIRGAS-CON é materializada pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) (IBGE, 2017).

As modernas missões espaciais também têm possibilitado a observação da gravidade terrestre com acurácia e alta resolução temporal, o que tem sido útil no monitoramento de alterações locais e regionais de massas. Os satélites do sistema *Gravity Recovery And Climate Experiment* (GRACE), são utilizados para estudos referentes ao geoide e aos fenômenos físicos que ocorrem acima, sobre e abaixo da superfície da Terra. Barzaghi et al., (2015) acrescentam que um dos benefícios da missão GRACE está correlacionado com as mensurações do geoide terrestre e suas alterações temporais devido aos deslocamentos de massas, resultantes dos ciclos hidrogeológicos e das mudanças climáticas.

A missão GRACE é um experimento proveniente de uma parceria entre a Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*) e o *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR) da Alemanha. O objetivo principal de mensurar a gravidade da Terra para o monitoramento de mudanças climáticas (COSTA et al., 2012).

Um dos produtos provenientes do sistema GRACE diz respeito à espessura equivalente de água (EWT- *Equivalent Water Thickness*), que tem sido utilizada no monitoramento de eventos climáticos extremos, principalmente de seca, e também no comportamento hidrológico de áreas úmidas (HOUBORG et al., 2012; PENATTI et al., 2015).

O acúmulo sazonal de grandes massas de águas em escala geográfica local e regional, também tem sido detectado pela rede SIRGAS, por meio de alterações nas altitudes registradas pelos receptores GNSS. Em períodos de maior ocorrência de chuvas, a massa de água infiltrada no solo faz aumentar a gravidade local e as altitudes geodésicas observadas nos receptores de alta precisão da rede SIRGAS atingem valores menores, uma vez que a gravidade local exerce maior força de atração sobre a superfície terrestre (RAMILLIEN et al., 2014; COSTA et al., 2012).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a correlação de séries temporais entre as variações altimétricas da rede de monitoramento SIRGAS/RBMC e as variações dos dados observados pelo sistema GRACE nas regiões norte, centro-oeste, nordeste e sudeste do Brasil. Trata-se de uma abordagem mais abrangente, em quatro grandes bacias hidrográficas do Brasil, dando continuidade às pesquisas iniciadas originalmente por Amaral (2017), que figura como coautor no presente trabalho.

## **2 METODOLOGIA**

Neste trabalho a área de estudo é formada por quatro grandes bacias hidrográficas, sendo elas a Amazônica, a do rio Tocantins, a do rio Paraná e a do rio São Francisco (Figura 1). A área de estudo ocupa uma porção 75,80% do território brasileiro, com dimensão de 6.455.458 km<sup>2</sup>. Segundo dados do censo demográfico de 2010, na região analisada residiam à época uma população de 90.946.087 habitantes, cerca de 47% da população nacional.

**Figura 1** – Área de estudo formada por quatro grandes bacias hidrográficas no Brasil. As delimitações das bacias nas regiões fronteiriças não foram efetuadas porque as mesmas extrapolam o território nacional



Fonte: O autor

O estudo foi realizado com dados GNSS da rede SIRGAS/RBMC e informações provenientes da missão GRACE, com resolução temporal mensal, entre os anos de 2011 e 2013. Até o ano de 2013, na área de estudo havia 53 receptores GNSS que integravam a rede SIRGAS/RBMC. Na ocasião, o território nacional contava com 101 receptores de monitoramento contínuo (Figura 2).

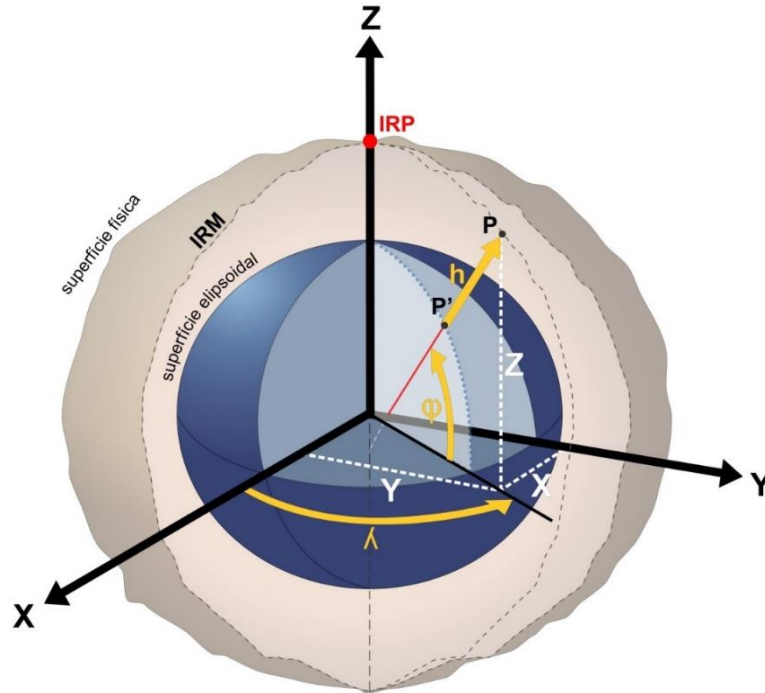
**Figura 2** – Receptores GNSS que Integravam a Rede SIRGAS / RBMC, em janeiro de 2014



Após a definição da área de estudo, deu-se início à coleta de dados. Os primeiros dados coletados foram aqueles referentes às observações de posicionamento da rede SIRGAS. Os dados dessas estações são fornecidos em coordenadas cartesianas tridimensionais, com resolução temporal semanal, ou seja, para cada semana, em cada estação GNSS há uma coordenada cartesiana X, Y, Z disponível. Os dados da rede SIRGAS foram obtidos a partir do site [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org).

As coordenadas cartesianas tridimensionais têm como origem o centro de massa da Terra. O eixo X aponta para a intersecção entre o plano equatorial e o meridiano internacional de referência (*IRM, International reference Meridian*). O eixo Y aponta para a intersecção do plano equatorial com a longitude 90° E, formando um sistema dextrogiro. Finalmente, o eixo Z aponta para o polo norte internacional de referência (*IRP, International Reference Pole*), conforme se pode observar na Figura 3.

**Figura 3** – Coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais e coordenadas geodésicas curvilíneas



Fonte: O autor

As coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  foram transformadas em coordenadas geodésicas curvilíneas  $\varphi$ ,  $\lambda$ , e  $h$ , por meio das seguintes equações:

$$\varphi_P = \arctan\left(\frac{Z + e'^2 \cdot b \cdot \sin^3 u}{\sqrt{X^2 + Y^2} + e^2 \cdot a \cdot \cos^3 u}\right) \quad (1)$$

$$\lambda_P = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2)$$

$$h_P = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos(\varphi)} - N \quad (3)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

$$e^2 = f(2 - f) \quad (5)$$

$$e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2} \quad (6)$$

$$\sin u = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \quad (7)$$

$$\cos u = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \quad (8)$$

$$\tan u = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \frac{a}{b} \quad (9)$$

Sendo:

- $a$  e  $b$ : semieixos maior e menor do elipsoide, respectivamente
- $f$ : achatamento polar;
- $e$  e  $e'$ : primeira e segunda excentricidade, respectivamente;
- $\varphi$  e  $\lambda$ : latitude e longitude geodésica, respectivamente;
- $h$ : altitude geométrica;
- $N$ : raio de curvatura da seção primeiro vertical; e
- $u$ : latitude reduzida.

Para utilização das equações descritas na resolução, os parâmetros a serem utilizados para a conversão das coordenadas, foi considerado o elipsóide GRS-80, utilizado pelo SIRGAS.

$$a = 6.378.137 \text{ m}$$

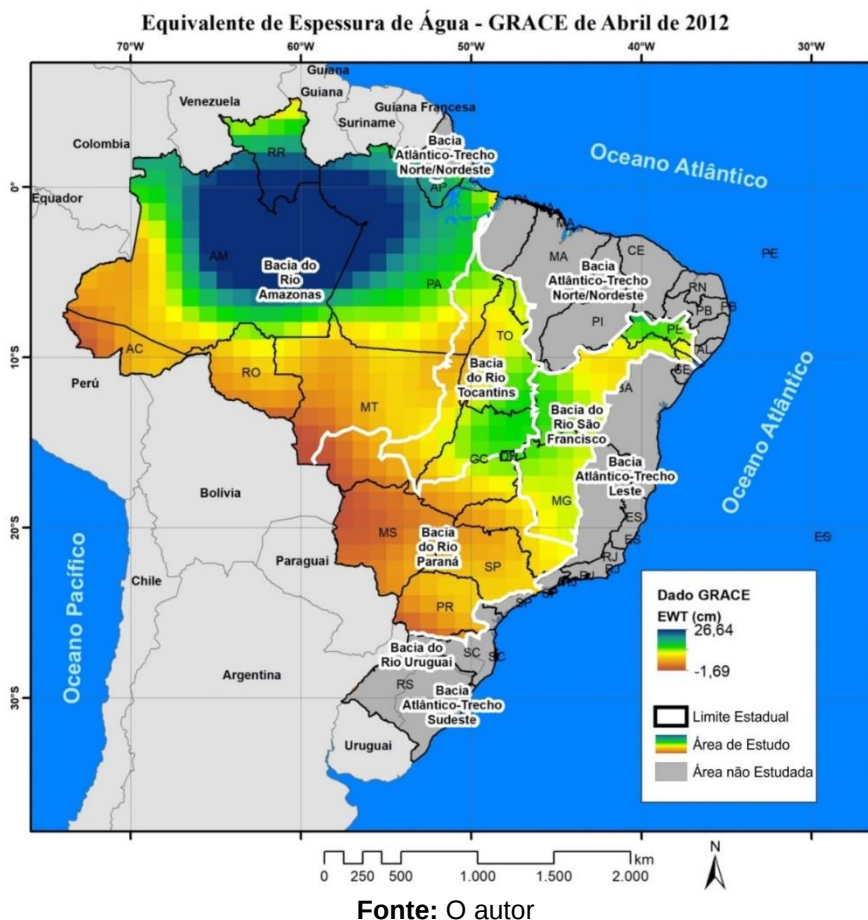
$$b = 6.356.752,314 \text{ m}$$

$$f = 1/298,2572222101$$

Após a transformação das coordenadas tridimensionais para geodésicas, com o intuito de se viabilizar a integração com os dados mensais advindos da missão GRACE, foram calculadas as médias mensais de variação de altitude elipsoidal para cada estação GNSS. Em seguida foi identificado o menor valor das altitudes de cada estação dentro de um mesmo ano.

Posteriormente foram obtidos os dados GRACE para o Brasil, a partir do site do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade federal de Goiás (UFG), no endereço [www.lapig.iesa.ufg.br](http://www.lapig.iesa.ufg.br). Um dos produtos resultantes deste experimento é o dado de EWT, que é armazenado em uma estrutura matricial. Tanto os dados GRACE, quanto os dados da rede SIRGAS foram organizados para o recorte temporal entre fevereiro de 2011 e dezembro de 2013, em resolução temporal mensal. Como exemplo, os dados GRACE referentes ao mês de abril de 2012 são exibidos na Figura 4.

**Figura 4** – Dados GRACE de EWT para o mês de abril de 2012, com destaque ao grande volume d'água subterrânea em parte da bacia amazônica



De posse desses dois conjuntos de dados, foi realizada a integração espacial entre os dados pontuais da rede GNSS SIRGAS e os dados GRACE, de tal forma que, para cada estação GNSS, foi possível se obter as variações de altitude elipsoidal e a espessura equivalente de água. Nesse sentido, cada estação GNSS dispunha dos seguintes dados:

- altitudes geodésicas médias mensais;
- altitudes geodésicas mínimas para cada ano de estudo; e
- valores mensais de EWT.

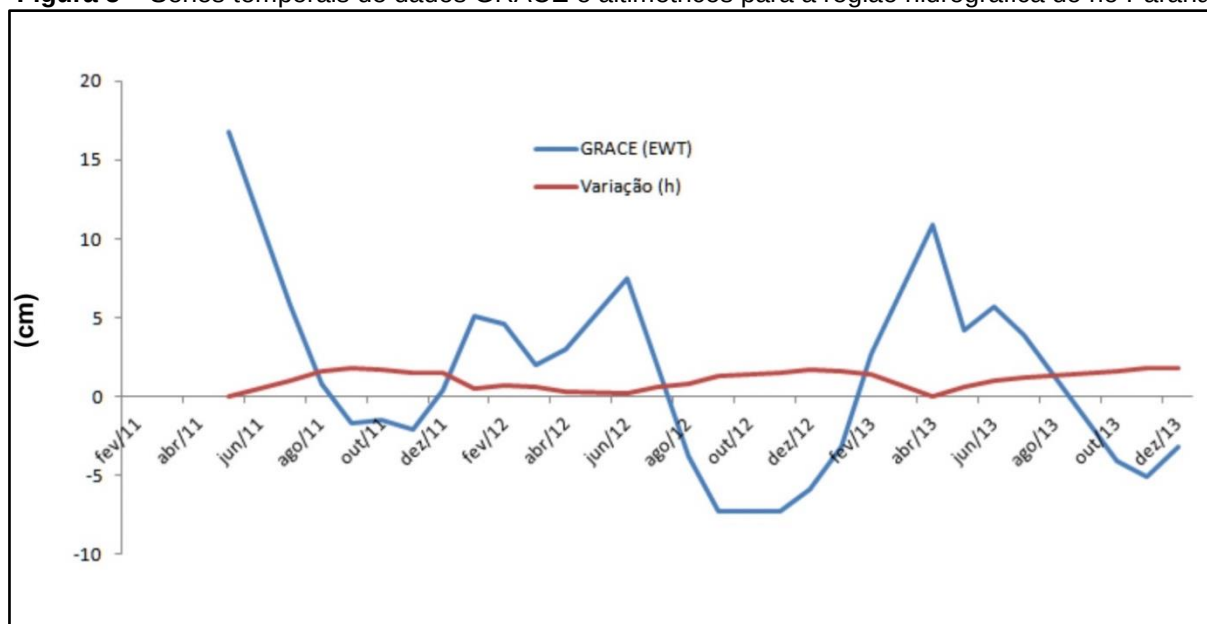
A comparação entre os conjuntos de dados foi realizada por meio de análise de regressão, no intuito de se verificar se o relacionamento é linear, se é positivo ou não, e ainda, se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é um valor próximo da unidade.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado obtido foi o conjunto organizado de dados SIRGAS e GRACE, com vistas à devida integração. Os valores altimétricos mensais foram subtraídos das altitudes mínimas anuais para cada estação GNSS, resultando nas variações altimétricas auferidas dentro de um mesmo ano. Essas variações altimétricas mensais foram comparadas com as variações de EWT em cada estação GNSS. Em seguida, os dados pontuais foram categorizados por bacia hidrográfica, com o intuito de se conhecer o nível de relacionamento entre os dados EWT e as variações de altitude geodésica em cada bacia hidrográfica.

Na integração dos dados GRACE e altitudes SIRGAS para a bacia hidrográfica do rio Paraná, foram utilizadas 21 estações SIRGAS/RBMC (BRAZ, EESC, GOJA, ILHA, MGIN, MGUB, MGVA, MSCG, OURI, POLI, PPTE, PRGU, PRMA, ROSA, SJRP, SPAR, SPBO, SPCA, SPJA, UBER, UFPR, POAL, SCCH, SCLA e SMAR). Os gráficos da Figura 5 permitem observar uma série temporal de amplitudes maiores para os dados GRACE do que para os dados GNSS, denotando um comportamento inverso das duas séries temporais: quando os dados GRACE alcançam valores altos, os dados altimétricos alcançam valores mínimos e vice-versa.

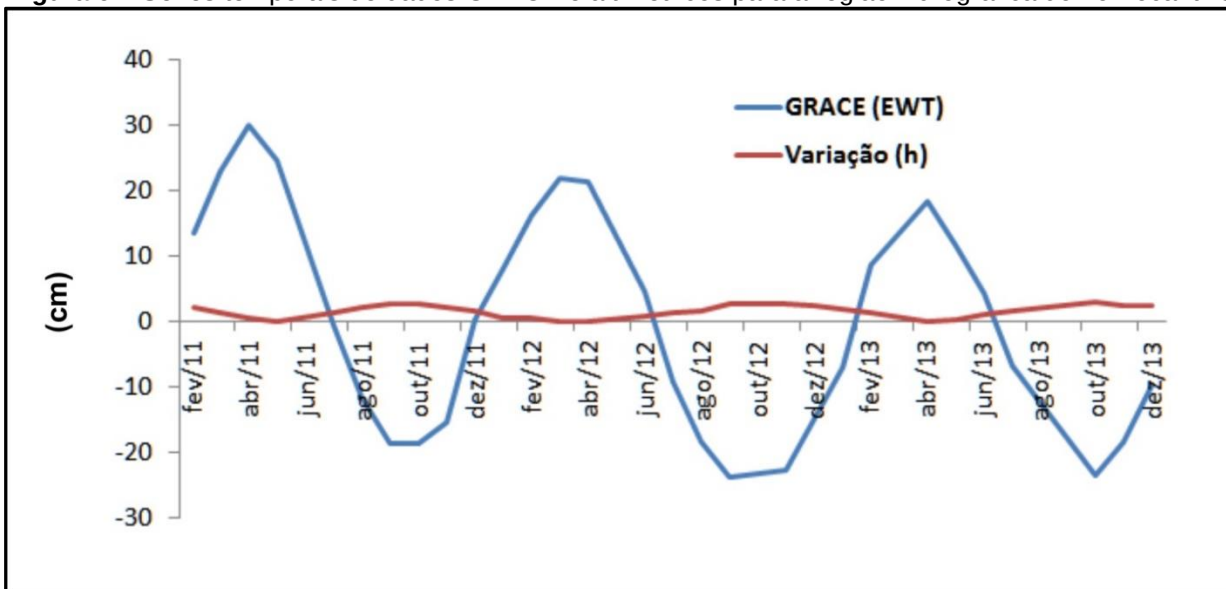
**Figura 5** – Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a região hidrográfica do rio Paraná



Fonte: Adaptado de Amaral, 2017

No caso da bacia hidrográfica do rio Tocantins, foram consideradas seis estações SIRGAS/RBMC (IMPZ, MABA, MTBA, MTSF, TOGU e TOPL). A Figura 6 mostra que o comportamento das séries temporais do GRACE e das variações altimétricas é similar ao que foi constatado na bacia hidrográfica do rio Paraná.

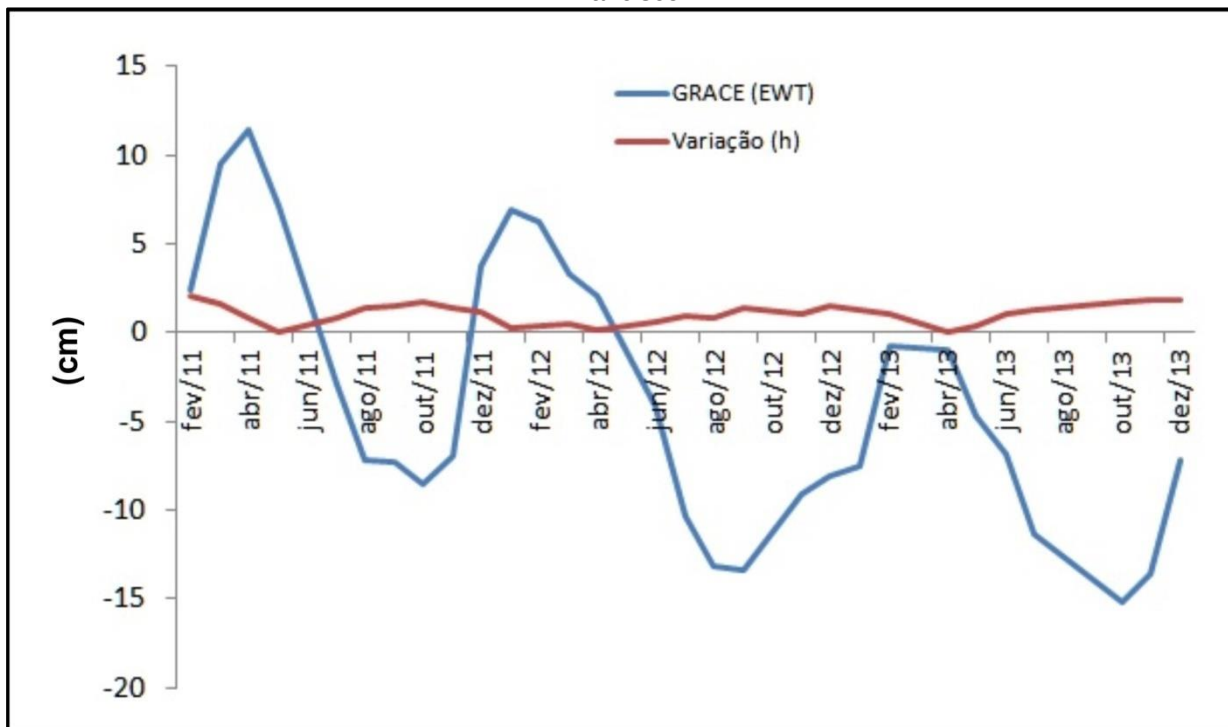
**Figura 6** – Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a região hidrográfica do rio Tocantins



Fonte: Adaptado de Amaral, 2017

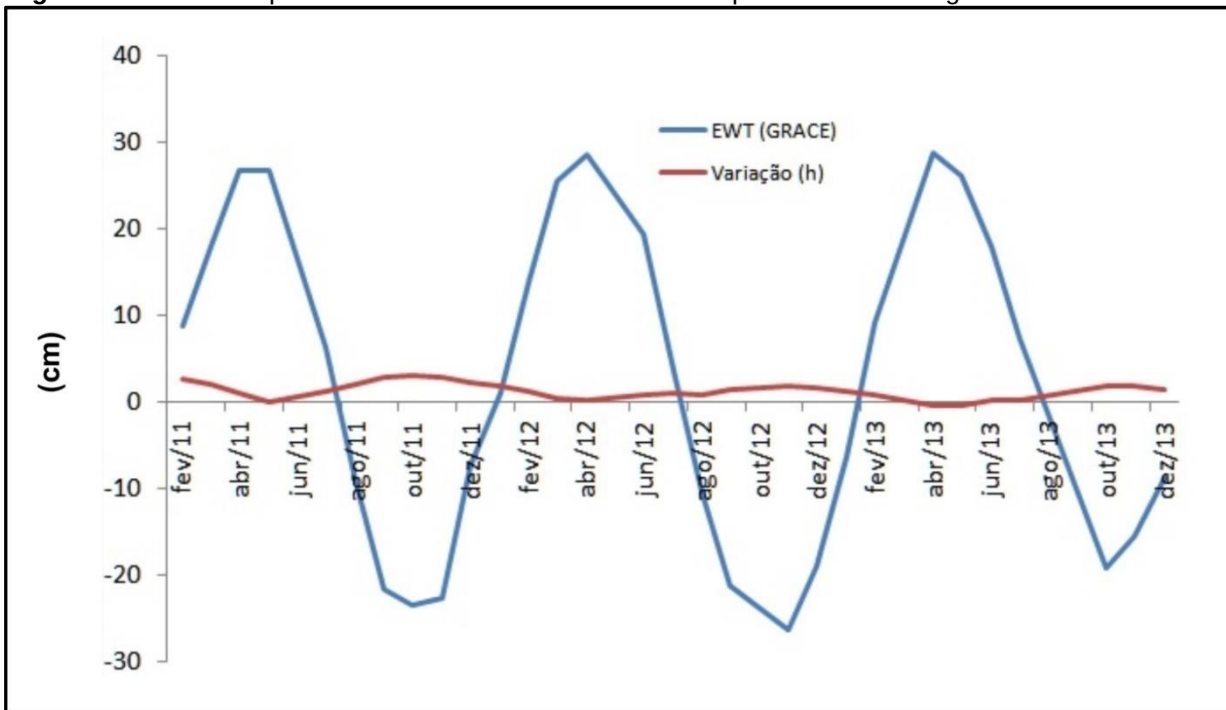
Na bacia hidrográfica do rio São Francisco, um total de nove estações SIRGAS/RBMC foram empregadas na análise (ALAR, BABR, BAIR, BOMJ, MCLA, MGBH, MGMC, MGRP e PEPE). Pela Figura 7 é possível observar que a série temporal da missão GRACE apresentou uma tendência na diminuição do EWT entre 2011 e 2013, enquanto as variações altimétricas não apresentaram a mesma tendência. Esse comportamento pode indicar que a quantidade de água está diminuindo com o passar do tempo. Todavia a relação inversa entre as duas séries temporais foi mantida.

**Figura 7** – Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a bacia hidrográfica do rio São Francisco



Fonte: O autor

Em relação à bacia do rio Amazonas, as análises foram conduzidas a partir de 17 estações SIRGAS/RBMC (AMCO, APSA, BOAV, CRUZ, MAPA, MTCN, MTCO, MTSR, MTVB, NAUS, PAAT, PAIT, POVE, RIOB, ROCD, ROJI e SAGA). A Figura 8 permite verificar uma série temporal de sazonalidade importante e praticamente sem tendência dos dados GRACE, enquanto a série temporal de variações altimétricas apresenta amplitudes um pouco maiores em comparação com as bacias hidrográficas anteriores, mas também de comportamento inverso em relação aos dados GNSS.

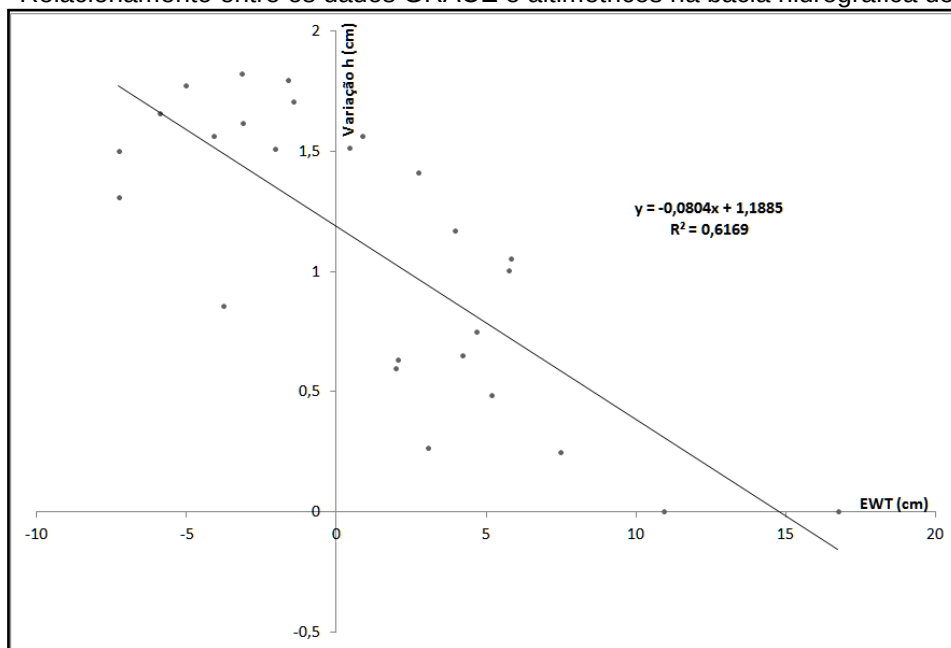
**Figura 8** – Séries temporais de dados GRACE e altimétricos para a bacia hidrográfica do rio Amazonas

Fonte: O autor

Esse comportamento invertido das séries temporais na área de estudo pode ser explicado pela alteração da gravidade nas bacias hidrográficas analisadas, devido à variação da massa de água durante os meses do ano. Nos meses com maiores ocorrências de pluviosidade, a missão GRACE registra maiores valores de EWT, fazendo com que ocorram pequenas movimentações superfícies terrestres, aumentando a força de gravidade e diminuindo os valores de altitude elipsoidal. Nos meses mais secos ocorre o inverso: a quantidade de massa de água nas bacias diminui, fazendo com que a gravidade também seja menor, produzindo uma elevação dos valores de altitude elipsoidal.

Adicionalmente, por meio de análise de regressão, houve a possibilidade de se comprovar esses relacionamentos para cada bacia hidrográfica, tendo sido evidenciados em alguns casos, bons coeficientes de determinação. A inclinação descendente da reta denota o mesmo comportamento invertido verificado nas séries temporais dos conjuntos de dados analisados. Na Figura 9 é possível observar o resultado da análise de regressão entre os dois conjuntos de dados, para a bacia do rio Paraná.

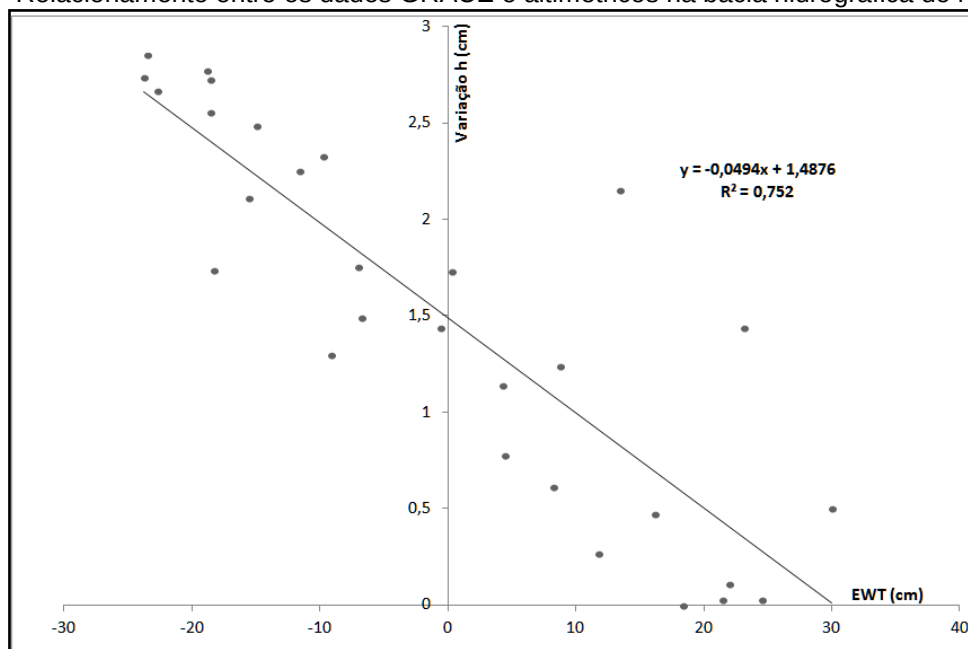
**Figura 9** – Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Paraná



Fonte: Amaral, 2017

Relacionamento similar também pode ser visualizado na Figura 10, que trata da bacia hidrográfica do rio Tocantins, denotando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) um pouco maior do que o observado na bacia do rio Paraná.

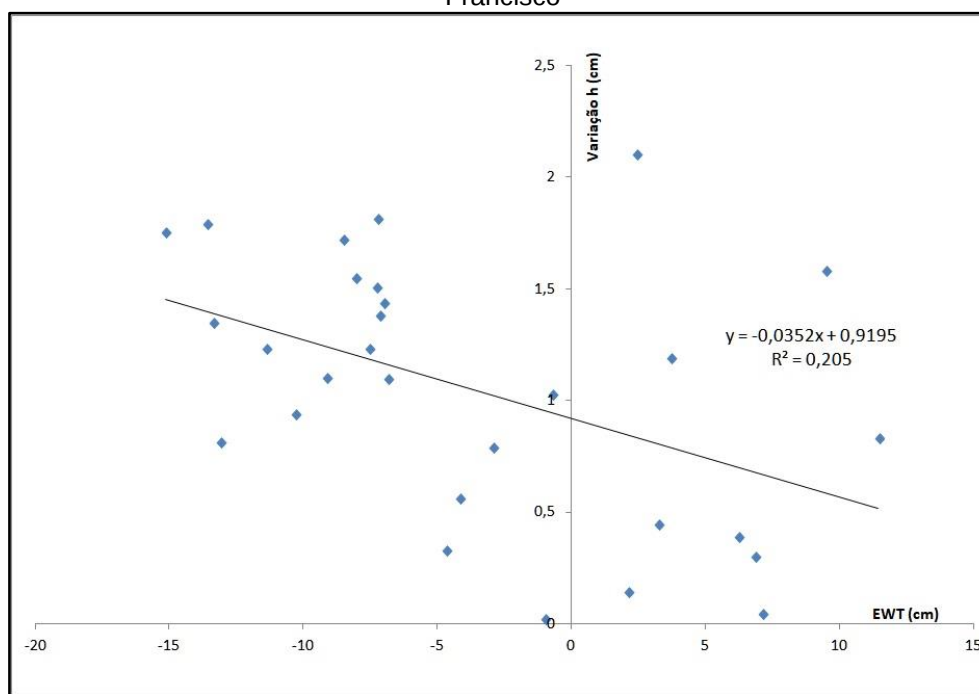
**Figura 10** – Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Tocantins



Fonte: Amaral, 2017

Conforme se pode ver através da Figura 11, que retrata a análise efetuada na bacia do rio São Francisco, também ficou evidenciada a mesma tendência das bacias anteriormente enfocadas. Entretanto, constata-se que a alta dispersão dos dados analisados é condizente com o diminuto valor de  $R^2$ , próximo a 0,2. De fato, as séries temporais bastante distintas para o rio São Francisco, já indicavam pouca concordância entre os dados.

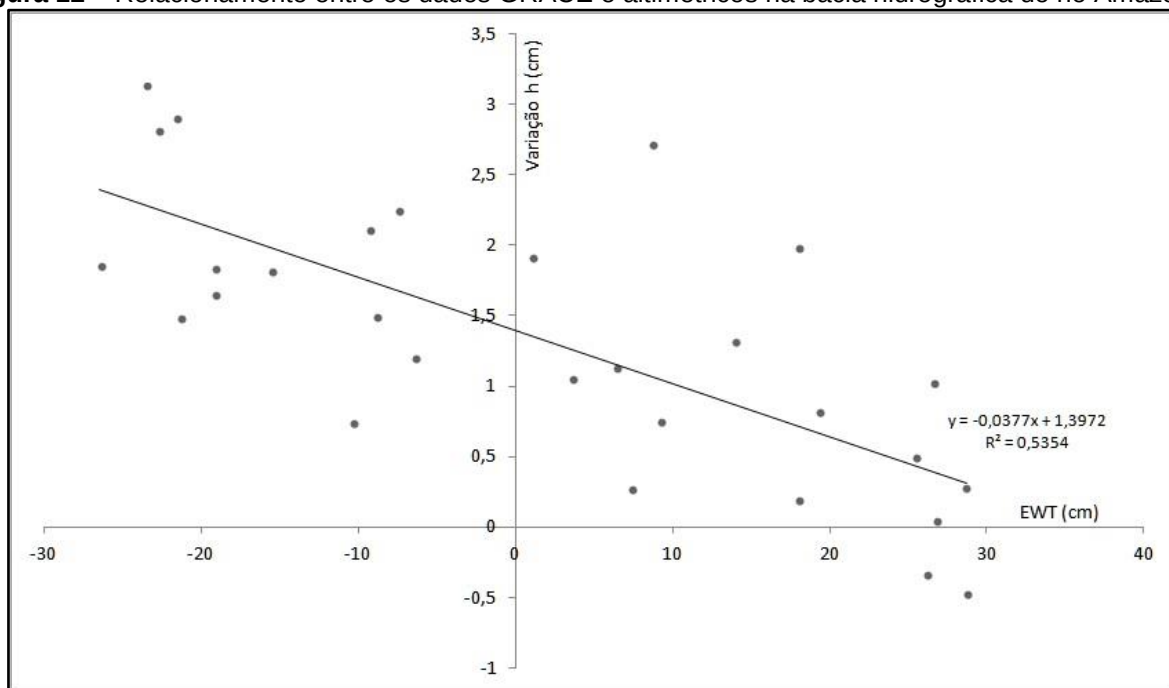
**Figura 11** – Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco



Fonte: O autor

A comparação entre as séries de dados GRACE e GNSS/SIRGAS indicou que também há correlação negativa na bacia hidrográfica do rio Amazonas, conforme mostra a Figura 12. No entanto, observa-se uma dispersão expressiva dos dados, fazendo com que o coeficiente de determinação  $R^2$  tenha ficado próximo a 0,53.

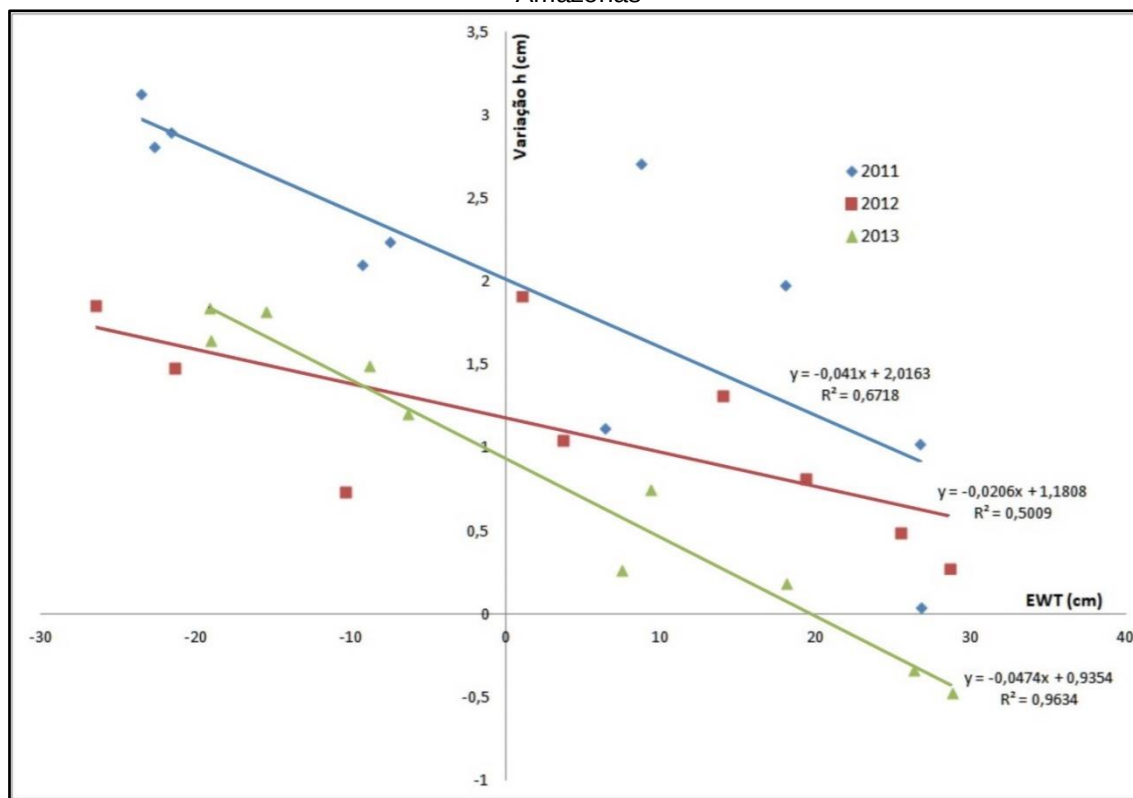
**Figura 12** – Relacionamento entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Amazonas



Fonte: O autor

Ainda com relação à bacia Amazônica, cabe observar que, no ano de 2013, a rede SIRGAS/RBMC era composta por 17 estações de monitoramento contínuo. Ao passo que nos anos anteriores de 2011 e 2012, a rede SIRGAS/RBMC continha 11 estações de monitoramento na mesma região. Sendo assim, foram realizadas análises de regressão anuais, obtendo-se o gráfico ilustrado na Figura 13, cujos resultados permitem observar coeficientes de determinação menores para os anos de 2011 e 2012, com valores de 0,67 e 0,50 respectivamente. No caso de 2013, o coeficiente de determinação da análise de regressão entre os dados de GNSS e GRACE, foi de 0,96, provavelmente pela maior quantidade de estações SIRGAS/RBMC.

**Figura 13** – Relacionamento anual entre os dados GRACE e altimétricos na bacia hidrográfica do rio Amazonas



Fonte: O autor

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que há uma importante correlação entre os dados GRACE e os dados altimétricos da rede de estações SIRGAS / RBMC nas bacias hidrográficas da área de estudo. Essa correlação pode servir para elaborar modelos matemáticos capazes de quantificar a presença de água no solo a partir da observação da variação altimétrica ao longo do tempo. A análise dos dados na bacia do rio Amazonas indicou a probabilidade de que uma quantidade maior de estações de monitoramento contínuo poderia melhorar o nível de relacionamento entre dados GRACE e GNSS, produzindo assim melhores modelos matemáticos.

A densificação da rede de estações SIRGAS / RBMC nessas grandes bacias hidrográficas brasileiras possibilita múltiplos usos, além do monitoramento hidrológico e de outras variáveis ambientais. Dentre outras aplicações, essa rede de estações GNSS pode ser empregada na elaboração de obras de infraestrutura, mapeamento em geral, controle fundiário, planejamento urbano e agricultura de precisão.

Concluindo, a partir de uma gradativa densificação da rede de estações SIRGAS / RBMC, com ênfase nos territórios ocupados pelas bacias hidrográficas nacionais, seria possível elaborar modelos matemáticos cada vez mais confiáveis, que representassem o relacionamento entre as altitudes GNSS e os dados GRACE em cada Unidade Hidrográfica. Com esse aporte talvez seja possível, futuramente, viabilizar a produção de produtos EWT a partir de informações provenientes da rede SIRGAS/RBMC, indicando tendências que permitam auxiliar no monitoramento voltado à prevenção e redução dos efeitos das secas e inundações no Brasil.

## 5 REFERÊNCIAS

AMARAL R.B. **Análise de dados do satélite GRACE e da rede GNSS SIRGAS para o monitoramento de águas subterrâneas**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

BARZAGHI, R.; MIGLIACCIO, F.; REGUZZONI, M.; • ALBERTA ALBERTELLA, A. et al. The Earth gravity field in the time of satellites. DOI 10.1007/s12210-015-0382-9. **Accademia Nazionale dei Lincei**. Springer. 2015.

BEVIS, M. et al. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, p. 1–4, 2005.

BOLKAS, D.; FOTOPOULOS, G.; SIDERIS, M. G. Referencing regional geoid-based vertical datums to national tide gauge networks. **Journal of Geodetic Science**, v. 2, n. 4, p. 363–369, 2012.

CHAVES, J. C. et al. **Deformação do Sistema Terrestre: Controle Geodésico de Estações da Rede SIRGAS-CON-D**. Disponível em: <[https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO\\_CD/artigos/Cad\\_Geod\\_Agrim/Geodesia e Agrimensura/A\\_68.pdf](https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/Cad_Geod_Agrim/Geodesia e Agrimensura/A_68.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C. DE; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE) with gauge data in the Amazon Basin. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, 2012.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA e ESTATÍSTICA. Redes Geodésicas. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC)**. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>. Acesso em 15 dez 2017.

HOUBORG, R. et al. Drought indicators based on model-assimilated Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) terrestrial water storage observations. **Water Resources Research**, v. 48, n. 7, p. n/a--n/a, 2012.

MONICO, J.; SAPUCCI, L. **GPS Meteorologia: Fundamentos e Possibilidades de Aplicações no Brasil**. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2003.

MOREIRA, D.M. **Geodesia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica**. Rio de Janeiro. Tese (doutorado). XXV, 229 p.: il.; 29,7 cm. UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

PENATTI, N. C. et al. Satellite-based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland. **Remote Sensing of Environment**, v. 170, p. 1–13, 2015.

RAMILLIEN, G.; FRAPPART, F.; SEOANE, L. Application of the Regional Water Mass Variations from GRACE Satellite Gravimetry to Large-Scale Water Management in Africa. **Remote Sensing**, v. 6, p. 7379–7405, 2014.

SIRGAS. SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS. **Rede SIRGAS-CON**. Disponível em: <[www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)>. Acesso em: 05 mar. 2018. (SIRGAS, 2018).

## **APÊNDICE 4**

### **O MODELO GEOIDAL DE GOIÁS – MODGEO-GO**

## O MODELO GEOIDAL DE GOIÁS – MODGEO-GO

### *The Geoid Model of Goiás – MODGEO-GO*

Carlos Alberto Correa e CASTRO JÚNIOR<sup>1</sup>, Gabriel do Nascimento GUIMARÃES<sup>2</sup>, Nilson Clementino FERREIRA<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup> Universidade Federal de Goiás – UFG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia – GO. E-mail: {correaecastrojr, nclferreira}@gmail.com

<sup>(2)</sup> Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Campus Monte Carmelo. Curso de Engenharia De Agrimensura e Cartográfica. E-mail: gabriel@ufu.br

**Resumo.** As limitações impostas pelos biomas brasileiros, atreladas a questões socioeconômicas, dificultaram sobremaneira a implantação de um arcabouço geodésico em parte do país. Por conta dessas circunstâncias há diversas áreas desprovidas de infraestrutura geodésica. No que tange à componente planimétrica, as opções vinculadas ao GNSS satisfazem plenamente às necessidades corriqueiras. Entretanto, quando o posicionamento vertical precisa ser determinado com exatidão, as altitudes fornecidas pelo GNSS não atendem a maior parte das aplicações triviais e demandadas pelas grandes obras da engenharia, sobretudo aquelas que envolvem fluxos d'água. Para possibilitar a obtenção de altitudes precisas e vinculadas ao campo de gravidade terrestre se faz necessário contar com um modelo geoidal. O último modelo geoidal nacional, MAPGEO2015, não atende adequadamente a todas as necessidades altimétricas de Goiás, razão pela qual o objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo geoidal estadual para tentar contemplar todos os segmentos usuários que necessitam de altitudes consistentes. Para tanto, foi utilizada a integral modificada de Stokes por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A decomposição espectral foi empregada no cálculo dos modelos, sendo que a componente de longo comprimento de onda foi representada pelos modelos EIGEN-6C4, GOCO05C e GECO até grau e ordem 200 e 250. Os modelos foram comparados em termos de comparações absolutas a partir de 140 estações GPS sobre nivelamento. Os resultados dos 3 modelos se mostraram consistentes entre si com melhor convergência para o grau e ordem 250.

**Palavras-chave.** geoide, gravimetria, GOCE, integral de Stokes

**Abstract.** The limitations imposed by the Brazilian biomes, linked to socioeconomic issues, have greatly hampered the implementation of a geodetic framework in part of the country. Due to these circumstances there are several areas devoid of geodesic infrastructure, leading the user community to adopt alternative solutions, some of which are inadequate. Regarding the planimetric component, the GNSS-related options fully meet common needs. However, when vertical positioning needs to be determined accurately, the altitudes provided by the GNSS do not serve most of the trivial applications demanded by major engineering works, especially those involving water flows. To make it possible to obtain precise altitudes linked to the terrestrial gravity field, it is necessary to have a geoid model. The last national geoid model, MAPGEO2015, does not adequately meet all the altimetric needs of the State of Goiás, Brazil, which is why the aim of this paper was to elaborate a state geoid model to try contemplating all the user segments that need consistent attitudes. For this, the modified Stokes integral was used by means of the Fast Fourier Transform (FFT). The spectral decomposition was used in the calculation of the models, and the long wavelength component was represented by the EIGEN-6C4, GOCO05C and GECO models up to degree and order 200 and 250. The models were compared in terms of absolute comparisons from 140 stations GPS over leveling. The results of the three models were consistent with better convergence for the degree and order 250.

**Keywords.** geoid, gravimetry, GOCE, Stokes' integral

## 1 Introdução

Dentre os incontáveis benefícios provenientes dos satélites artificiais à ciência geodésica, destaca-se a disponibilização de coordenadas tridimensionais: latitude ( $\varphi$ ), longitude ( $\lambda$ ), e altitude geodésica ou geométrica ( $h$ ). As altitudes geodésicas, oriundas atualmente do Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS - *Global Navigation Satellite System*), são referidas a um elipsoide de revolução e possuem apenas natureza geométrica, carecendo de conotação física. Por conseguinte, é recomendável que o emprego de tais altitudes fique restrito às aplicações em que não haja envolvimento com o fluxo de água. De acordo com as explicações de Guimarães (2010) é a força de gravidade que norteia o trajeto dos fluidos; desconsiderar essa premissa num sistema altimétrico pode trazer inconveniências com relação ao armazenamento e escoamento de grandes massas d'água.

As principais vantagens decorrentes do uso das altitudes geodésicas estão correlacionadas com a facilidade de obtenção e a possibilidade de se alcançar precisões na casa do centímetro, desde que sejam usados receptores satelitais apropriados. Essas vantagens ficam ainda mais evidentes, em termos de custos e produtividade, ao se fazer uma analogia com a técnica de nivelamento geométrico geodésico, utilizada para a obtenção de altitude ortométrica ( $H$ ) em qualquer Referência de Nível (RN) do IBGE. O IBGE considera as altitudes das suas RRNN como sendo normais-ortométricas, por possuírem apenas a correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais. Entretanto a denominação altitude ortométrica é tradicionalmente aceita pela comunidade usuária.

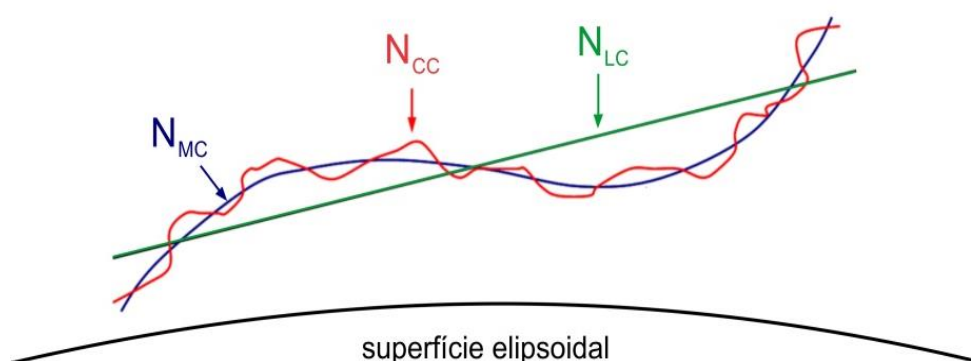
Para que as altitudes geodésicas passem a ter algum sentido físico precisam estar vinculadas ao campo de gravidade terrestre. Em outras palavras, é preciso substituir a referência geométrica de tais altitudes, representada pela superfície elipsoidal, por uma referência que represente a superfície equipotencial básica do campo de gravidade da Terra, denominada superfície geoidal. A grandeza que permite a transformação de altitudes geométricas em físicas, separando a superfície elipsoidal da geoidal, é a ondulação ou altura geoidal ( $N$ ). A expressão que correlaciona essas três grandezas, é dada por (1).

$$H \approx h - N \quad (1)$$

Essa expressão, aparentemente simples, se reveste de especial importância, na medida em que permite a obtenção de  $H$  por meio de um modelo geoidal. Indica ainda, segundo Vaníček et al. (2003), que a exatidão de  $H$  depende primordialmente da precisão de  $N$ , ou seja, da precisão do modelo geoidal adotado. Os mesmos autores informam que há poucas regiões do mundo que possuem modelos geoidais compatíveis com as precisões alcançadas pelos receptores GNSS geodésicos.

As diferentes contribuições para o cálculo rigoroso de  $N$ , por meio de um modelo geoidal gravimétrico, são evidenciadas por Guimarães (2013), ao discorrer sobre a existência de componentes de longo, médio e curto comprimento de ondas nas ondulações geoidais, expressos em unidades métricas. Apesar de não haver uma divisão rígida das dimensões de tais componentes, os longos comprimentos ( $N_{LC}$ ) correspondem às baixas frequências das ondulações, advêm dos Modelos Globais do Geopotencial e representam um geóide com contornos suaves; os médios comprimentos ( $N_{MC}$ ), provenientes das informações gravimétricas terrestres e oceânicas, produzem uma superfície geoidal mais irregular; os curtos comprimentos de onda ( $N_{CC}$ ) retratam as influências do relevo obtidas, por exemplo, de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e permitem maior detalhamento na representação das altas frequências das alturas geoidais. A Figura 1 expressa como essas distintas contribuições se complementam e influenciam conjuntamente nas conformações da superfície geoidal.

**Figura 1** – Componentes de longo, médio e curto comprimento de ondas nas ondulações geoidais



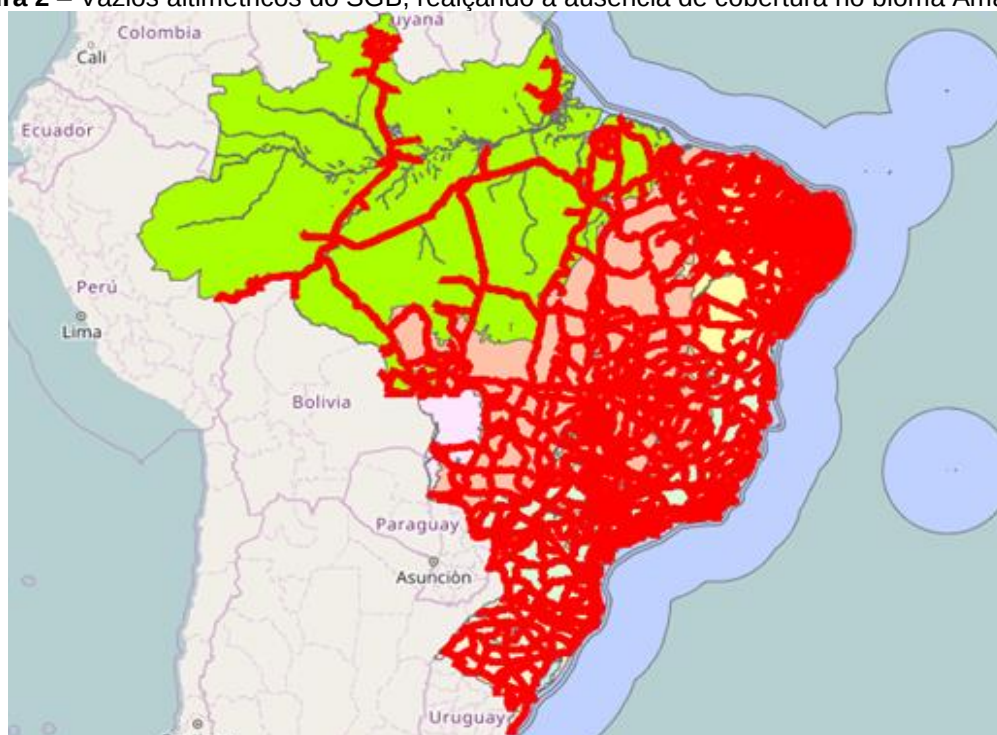
**Fonte:** Guimarães, 2013, modificado de Schwarz; Sideris; Forsberg, 1987

## 2 O porquê de um modelo geoidal para Goiás

Em termos genéricos, um modelo geoidal pode ser traduzido por um conjunto de dados devidamente estruturados e processados, permitindo, em última análise, o cálculo de ondulações geoidais. Guimarães et al. (2014) explicam que há diversas alternativas que, independentes ou combinadas, permitem a determinação de modelos geoidais; observa-se que nem todas as alternativas consideram, necessariamente, informações gravimétricas. As técnicas mais usadas são: integração numérica da fórmula de Stokes; integral de Stokes via Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*); Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ); funções harmônicas esféricas usadas no desenvolvimento em série do potencial gravitacional; diferenças entre as altitudes  $H$  e  $h$ , em RRNN rastreadas por GNSS; e, para os oceanos, altimetria satelital por radar.

A infraestrutura altimétrica oficial provida pelo IBGE, representada pelas RRNN que compõem a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), possui algumas limitações, dentre as quais se evidencia o recobrimento heterogêneo no país. Goldani (2006) reforça essas premissas e acrescenta que é praticamente inviável contar apenas com a RAAP para solucionar as demandas altimétricas em todo Brasil. O cartograma inserido na Figura 2 denota que essa cobertura altimétrica desigual que a RAAP proporciona atinge extensas áreas, principalmente o bioma Amazônia. Por conta de tais circunstâncias, as soluções práticas assumidas por grande parte dos profissionais que necessitam de uma informação altimétrica onde a RAAP não se faz presente, consistem na determinação de altitudes niveladas a partir de referências arbitrárias ou aproximadas. Em tais referências é usual o estabelecimento de altitudes geodésicas com o GNSS, que são transformadas em ortométricas através do mais recente modelo geoidal oficial brasileiro, o MAPGEO2015.

**Figura 2** – Vazios altimétricos do SGB, realçando a ausência de cobertura no bioma Amazônia



Fonte: Visualizador da INDE, 2017

O MAPGEO 2015 representa a quinta edição de modelo geoidal oficial nacional, elaborado através de esforços conjuntos envolvendo o IBGE e a Escola Politécnica da USP (EPUSP). O primeiro da série, o MAPGEO1992, foi elaborado apenas com informações satelitais, sem dados gravimétricos terrestres. Houve um segundo modelo, produzido em 1996 de forma similar ao seu antecessor. O terceiro modelo, denominado MAPGEO2004, foi disponibilizado por Lobianco (2005). A quarta versão, o MAPGEO2010, foi concebida por um número maior de autores e apresenta maior consistência que a anterior (Matos et al., 2012). As três últimas edições foram calculadas com a fórmula de Stokes combinada com um modelo do geopotencial; em decorrência, consideraram como insumo básico as observações terrestres de gravidade.

Em épocas distintas os modelos da série MAPGEO foram oficialmente adotados pelo IBGE para a obtenção de  $N$  em todo território brasileiro. Entretanto, essa abrangência nacional num país de dimensões continentais, acarretou a utilização de dados gravimétricos não homogêneos, advindos de diversas instituições e obtidos segundo metodologias, equipamentos e referenciais diferentes (Lobianco, 2005). Como a formulação de Stokes requer informações de faixas adicionais que extrapolam as fronteiras brasileiras, inúmeros dados de países vizinhos também foram

considerados nesses modelos nacionais, aumentando a desigualdade nas informações de gravidade (id., ibid.).

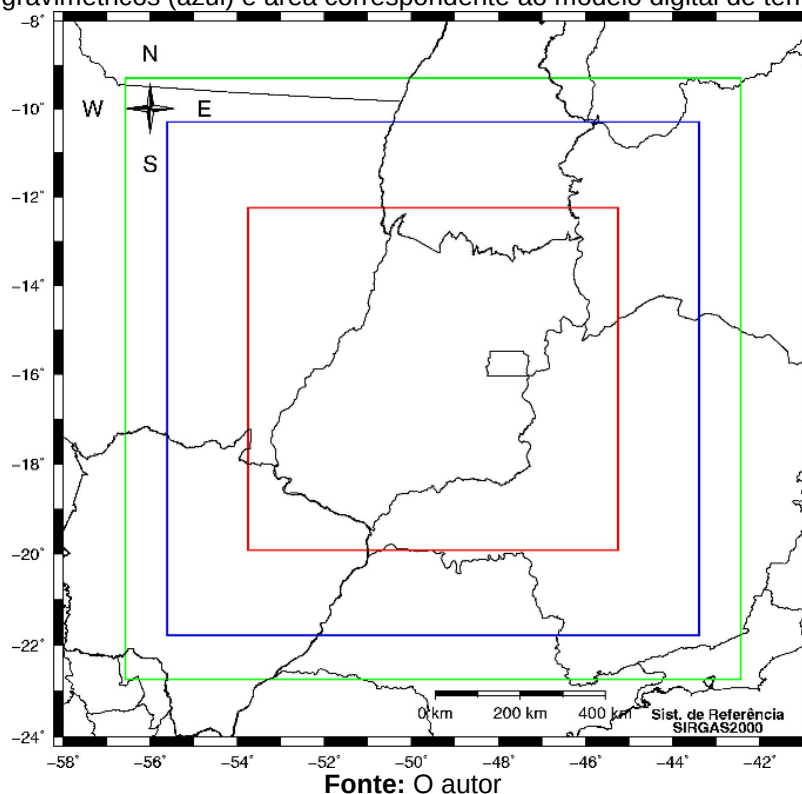
Em paralelo aos aspectos concernentes às heterogeneidades dos modelos geoidais nacionais, há outra peculiaridade relacionada à consistência. Conforme expõem Piña (2000), Silva (2002) e Guimarães (2010), a avaliação de um modelo geoidal deve ser efetuada através de comparações entre as ondulações geoidais calculadas pelo respectivo modelo, com aquelas oriundas de medições GNSS sobre RRNN. Ou seja, as diferenças entre as grandezas medidas de  $h$  e  $H$ , servem como parâmetro de comparação com as ondulações disponibilizadas pelo modelo geoidal avaliado. Todavia, esse tipo de procedimento possui limitações causadas principalmente pela configuração irregular e insuficiente da RAAP (NICACIO JUNIOR, 2017). Tais limitações, aliadas aos desiguais valores de precisão das RRNN, fazem com que os modelos da série MAPGEO ainda não possam ser validados adequadamente em grande parte do território brasileiro.

Para fazer frente às deficiências dos modelos geoidais nacionais, algumas unidades da federação buscaram o estabelecimento de modelos estaduais mais condizentes com as suas respectivas necessidades altimétricas. Silva (2002), Guimarães (2010) e (2013), ofereceram modelos geoidais para o estado de São Paulo. Goldani (2006) contemplou o Paraná com um modelo estadual apropriado. Recentemente, Silva (2017) calculou um modelo local para o Distrito Federal. Destarte, seguindo a tendência desses estados economicamente mais fortes, Goiás também apresenta o seu modelo geoidal o MODGEO-GO, visando possibilitar à comunidade goiana a obtenção de altitudes mais precisas e adequadas às suas reais conveniências.

## **2.1 Localização da área**

No intuito de se elaborar o MODGEO-GO, o primeiro passo foi definir as regiões envolvidas na modelagem (Figura 3). Por conseguinte, três áreas específicas foram consideradas no planejamento desse modelo geoidal: área a ser efetivamente modelada; área de dados gravimétricos (região onde foram coletadas informações correlacionadas com a aceleração de gravidade, representada por um retângulo com uma faixa adicional de 2° ao redor da área modelada); e, área correspondente ao modelo digital de terreno (3° de amplitude para cada lado da região efetivamente modelada).

**Figura 3** – Áreas consideradas no MODGEO-GO: área efetivamente modelada (em vermelho), área de dados gravimétricos (azul) e área correspondente ao modelo digital de terreno (verde)



Fonte: O autor

### 3 Material

Definidas as áreas de abrangência, as ações foram direcionadas à identificação e seleção dos dados envolvidos na construção e avaliação do MODGEO-GO. Nesse contexto, basicamente quatro conjuntos de dados foram considerados: estações gravimétricas terrestres, modelos do geopotencial global, modelos digitais do terreno e medições GNSS em RRNN.

#### 3.1 Estações gravimétricas terrestres

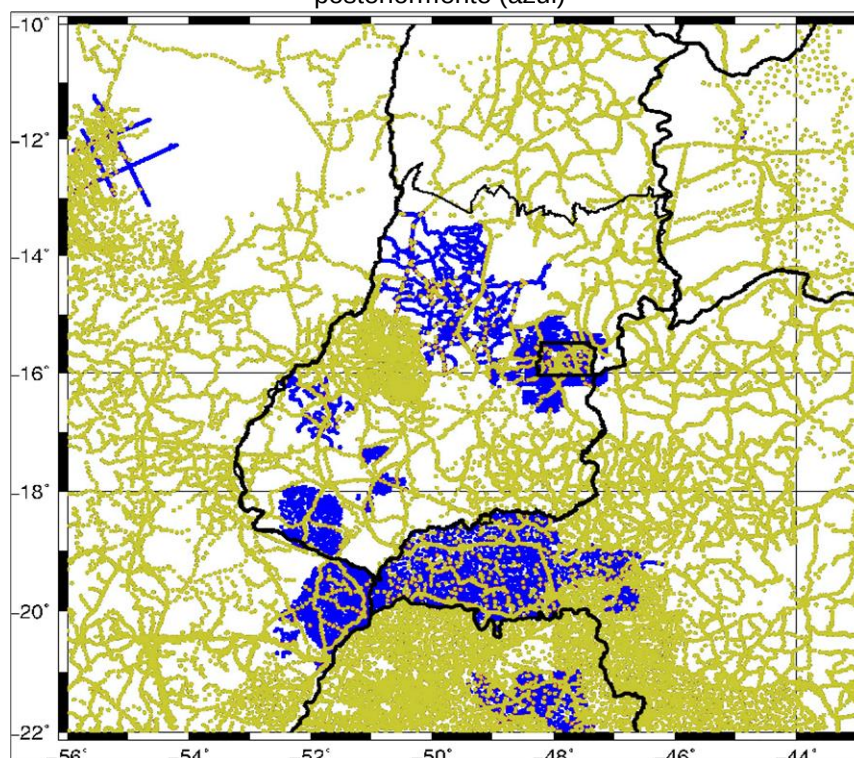
De acordo com Goldani (2006), a indisponibilidade de dados gravimétricos apropriados aos fins geodésicos, aliada à distribuição irregular dos mesmos, constitui a principal barreira ao estabelecimento de modelos geoidais em terras brasileiras. Por conta desse quadro, torna-se fundamental a continuada realização de atividades geodésicas voltadas à determinação de Estações Gravimétricas (EEGG) em regiões carentes de tais informações (id., *ibid.*).

A razão de ser das EEGG terrestres em um modelo geoidal calculado com a formulação de Stokes está correlacionada à obtenção dos médios comprimentos de onda das ondulações do geoide (Guimarães, 2013). Diante dos vazios gravimétricos

existentes na região modelada, centenas de novas EEGG tiveram que ser estabelecidas a fim de proporcionar um ganho de qualidade ao MODGEO-GO. Entretanto, dada à dificuldade de se recobrir todo o território a ser modelado em apenas quatro anos, o planejamento dessa malha gravimétrica considerou polos prioritários, onde foram contemplados, na medida do possível, os maiores vazios gravimétricos e as regiões economicamente mais ativas.

Foram 4600 novas EEGG, medidas em diferentes recantos de Goiás e do Distrito Federal, com o apoio da EPUSP e do IBGE desde 2013, quando surgiu a proposta de elaboração do MODGEO-GO. A convergência de esforços propiciada pelas duas instituições mencionadas denota a importância desta região no cenário nacional e decorre do fato de que as novas EEGG alimentarão as futuras versões de modelos geoidais nacionais e continentais. O cartograma constante na Figura 4 permite a visualização das 32446 estações que subsidiaram o cálculo do MODGEO-GO.

**Figura 4** – EEGG utilizadas no MODGEO-GO: estabelecidas antes de 2013 (em sépia) e medidas posteriormente (azul)

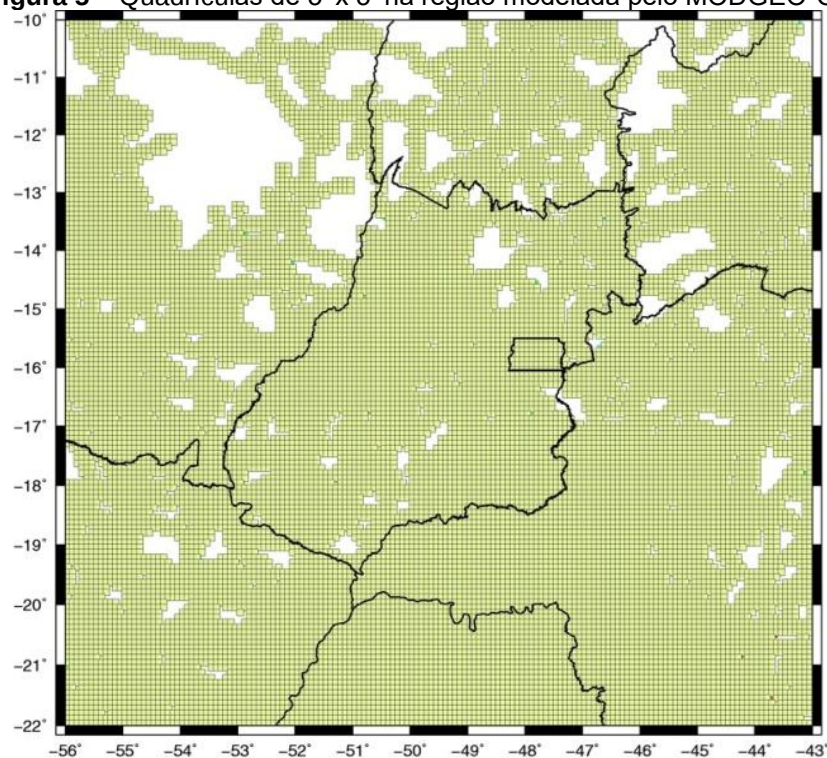


Fonte: O autor

A localização das EEGG buscou a configuração mais homogênea possível. Para as áreas de maior conurbação foram utilizadas quadrículas de 2,5'

(aproximadamente 4,5 km de lado). As demais regiões contempladas com densificação gravimétrica atenderam ao critério considerado no cálculo do MODGEO-GO, que subdividiu todo território a ser modelado em células básicas de 5'x 5' (cerca 9 km de lado). Assim, a conformação resultante pressupôs a existência de, no mínimo, uma EG em cada célula de 5'. Contudo, apesar de todo esforço empreendido, algumas regiões ainda não foram aquinhoadas com o desejável arcabouço gravimétrico atendendo a essa configuração básica, à semelhança do que ocorre na maior parte do território nacional. O cartograma constante na Figura 5 ilustra a subdivisão do território modelado pelo MODGEO-GO, contendo 22.464 quadrículas de 5'; as áreas remanescentes que ainda não possuem cobertura gravimétrica terrestre estão representadas na cor branca.

**Figura 5** – Quadrículas de 5' x 5' na região modelada pelo MODGEO-GO



Fonte: O autor

A medição da aceleração de gravidade ( $g$ ) em cada EG foi efetuada às margens de estradas ou caminhos onde o veículo empregado conseguiu chegar por, no mínimo, um gravímetro relativo. Na grande maioria das EEGG o gravímetro usado foi o LaCoste & Romberg, modelo G. Houve estações compartilhadas por um segundo gravímetro, o digital CG-5. Os circuitos gravimétricos sempre começaram e

terminaram em estações de referência, ou seja, com o valor de  $g$  conhecido. Todos esses circuitos tiveram duração máxima de 48 h com vistas às correções das derivas instrumentais. Em cada EG foi considerado o valor médio de um conjunto de três leituras e a hora da segunda leitura registrada. Tanto as EEGG como os circuitos gravimétricos possuem códigos que os identificam. Maiores detalhes sobre a operacionalidade empregada nas medições gravimétricas podem ser obtidos em Castro Junior (2005).

O registro e processamento das EEGG e, por conseguinte, dos circuitos gravimétricos foram conduzidos pelo programa Cadgrav, elaborado pelo IBGE e EPUSP. Esse programa é dividido em dois módulos principais: entrada de dados e processamento. Os circuitos são digitados, um a um, pelo módulo de entrada e remetidos ao módulo de processamento, denominado Redgrav. Dos diversos resultados oferecidos pelo Redgrav, foram considerados os valores da aceleração de gravidade, anomalias  $ar$  livre e anomalias Bouguer, devidamente corrigidas dos efeitos da atração luni-solar e das derivas instrumentais. Todos os dados gravimétricos coletados foram analisados e validados, a partir das derivas e anomalias obtidas.

Adicionalmente à mensuração de  $g$ , foram empreendidas medições de  $\varphi$ ,  $\lambda$  e  $h$ , em todas as EEGG. Tais coordenadas permitiram georreferenciar as estações terrestres e, adicionalmente, subsidiaram os processamentos decorrentes. Em sua grande maioria, essas coordenadas foram obtidas através de receptores GNSS geodésicos, adotando-se a estratégia de posicionamento relativo a partir de bases de rastreio locais, ou então, pós-processadas pelo aplicativo online do IBGE intitulado de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Os equipamentos compartilhados em duas das estações recentemente medidas, para atender ao MODGEO-GO, podem ser vistos pela Figura 6.

**Figura 6** – Equipamentos usados nas determinações das EEGG



**Fonte:** Acervo do autor

### 3.2 Modelo Global do Geopotencial

Conhecido também como Modelo Global Gravimétrico, um Modelo Global do Geopotencial (MGG) foi o segundo insumo básico que subsidiou a elaboração do MODGEO-GO. Quando um satélite artificial orbita ao redor da Terra, se comporta como se fosse um sensor do campo gravitacional terrestre ao sofrer perturbações advindas da distribuição não homogênea de massa do planeta. De acordo com Silva (2002), tais perturbações orbitais, devidamente estudadas e analisadas, possibilitam a determinação de um MGG. Esse mesmo autor, (*ibidem*, p.34), observa ainda que um MGG pode ser representado por uma superfície esferoidal a qual é intermediária entre o geoide e o elipsoide.

Guimarães (2010, p.56) acrescenta que um MGG é composto por um “conjunto de coeficientes da função potencial gravitacional da Terra desenvolvida em série de funções harmônicas esféricas”. Os MGGs permitem a obtenção dos longos comprimentos de onda das ondulações do geoide (*id.*, 2013). Gemaël (1999) e Lobianco (2005) oferecem pormenores sobre as funções harmônicas esféricas, cuja abordagem detalhada extrapola os objetivos deste artigo. Os MGGs são disponibilizados pelo Centro Internacional para Modelos Globais da Terra (ICGEM - *International Centre for Global Earth Models*), um dos cinco serviços subordinados ao Serviço Internacional do Campo de Gravidade (IGFS - *International Gravity Field Service*), da Associação Internacional de Geodesia (IAG - *International Association of Geodesy*).

Após análises sobre a procedência e especificidades dos modelos mais recentes, foram escolhidos três MGGs para cálculo e avaliação dos resultados do

MODGEO-GO: EIGEN-6C4 (Förste et al., 2015), GOCO05c (Fecher et al., 2016) e GECO (Gilardino et al., 2016) (Tabela 1). Conforme será mostrado adiante, os resultados oriundos desses MGGs foram convergentes. Entretanto, optou-se pelo EIGEN-6C4 a fim de manter o mesmo padrão adotado pelo MAPGEO2015.

O acrônimo EIGEN é composto pelas iniciais de “*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*”. O EIGEN-6C4 contém informações dos satélites LAGEOS, GRACE e GOCE, além de dados gravimétricos terrestres e de altimetria satelital. Uma característica que distingue o EIGEN-6C4 das demais versões do EIGEN diz respeito à maior resolução, ao oferecer informações sobre as funções harmônicas esféricas que alcançam grau e ordem 2190 (Förste et al., 2015); por conseguinte, a representação geométrica do EIGEN-6C4 permite retratar melhor as irregularidades da superfície geoidal nas regiões providas de informações gravimétricas terrestres. A tabela 1 sintetiza as principais características de cada MGG adotado neste estudo.

**Tabela 1** – Características dos modelos do geopotencial utilizados no cálculo do MODGEO-GO

| Modelo    | Ano  | Grau | Informações                        |
|-----------|------|------|------------------------------------|
| EIGEN-6C4 | 2014 | 2190 | A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos) |
| GOCO05c   | 2016 | 720  | A, G, S                            |
| GECO      | 2015 | 2190 | EGM2008, S(Goce)                   |

S – Informação de Satélite; A – Informação de Altimetria; G – Gravimetria aérea e/ou terrestre

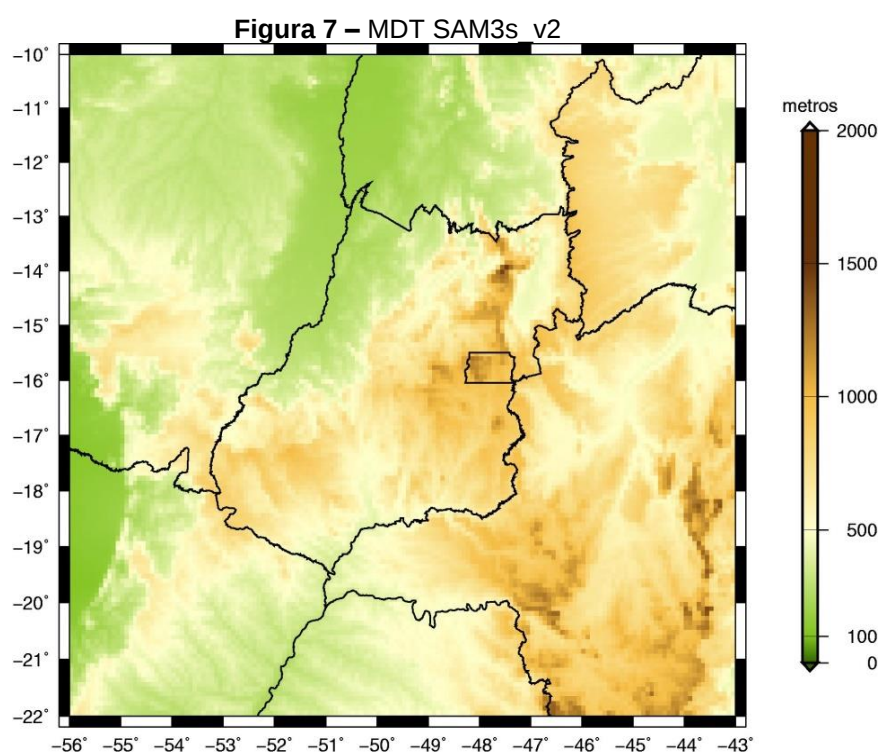
### 3.3 Modelo Digital do Terreno

Quando um modelo geoidal abarca extensas regiões, como é o caso do MODGEO-GO, existem áreas que não são acessíveis aos levantamentos gravimétricos terrestres e tampouco são detectadas pelos MGGs. Densas florestas, montanhas, locais sem infraestrutura viária e tantos outros, são passíveis de não se fazer representar com as informações gravimétricas desejáveis.

Esse quadro de heterogeneidades pode ser amenizado pelas contribuições de um Modelo Digital do Terreno (MDT). Basicamente um MDT consiste numa informação digital que representa o terreno, descrevendo as características topográficas de uma superfície física (Matos, 2005).

Para o MODGEO-GO foi considerado o MDT denominado SAM3s\_v2, cuja sigla representa a segunda versão do Modelo Sul Americano (SAM - *South American Model*), calculado para um grid de 3"x 3". A elaboração do SAM3s\_v2 ficou a cargo de Matos & Blitzkow (2008) e teve como referência principal o modelo global *Shuttle*

*Radar Topography Mission (SRTM)*, produzido através de uma estreita parceria entre as agências espaciais dos EUA, Alemanha e Itália (Blitzkow et al., 2016). À semelhança do MAPGEO2015, conforme abordagem posterior neste artigo, a adoção do SAM3s\_v2 pelo MODGEO-GO atendeu aos objetivos de se calcular a correção do terreno, correção entre o geóide e o quase geóide, as anomalias de gravidade de Bouguer, anomalias ar livre média, os efeitos topográficos direto, indireto primário, indireto secundário, além dos efeitos atmosféricos direto (Matos & Blitzkow, 2009). A Figura 7 retrata o SAM3s\_v2 na região onde foram coletados os dados gravimétricos.



Fonte: O autor

### 3.4 Medições GNSS em RRNN

Complementando o rol de insumos básicos destinados à avaliação do MODGEO-GO, houve a determinação precisa de  $h$ , por meio de observações GNSS, sobre algumas RRNN criteriosamente escolhidas. O objetivo precípuo foi coletar elementos que permitissem a comparação entre as ondulações medidas diretamente, com aquelas disponibilizadas pelo modelo geoidal. Essas comparações possibilitaram avaliações e decorrente validação do MODGEO-GO.

Habitualmente as atividades de medição GNSS são precedidas por um reconhecimento *in loco*, com vistas a identificar a existência de estações altimétricas

na região de trabalho e, ainda, verificar se as RRNN encontradas reúnem condições propícias ao rastreamento de satélites artificiais, sobretudo no tocante à estabilidade dos monumentos e possíveis reflexões ou obstruções dos sinais GNSS. Monico (2008), tece diversos comentários sobre os efeitos indesejáveis das obstruções aos sinais GNSS.

Os rastreios efetuados nas RRNN escolhidas ocorreram em três seções independentes, cada uma com duração mínima de três horas e com altura diferente para o centro elétrico da antena. Após o término de cada seção, o tripé foi removido e reinstalado de tal forma que uma nova centragem da antena teve que ser procedida. Esses cuidados foram rotineiramente adotados a fim de se detectar a incidência de eventuais erros grosseiros, correlacionados à centragem e à avaliação da altura do centro elétrico da antena GNSS com relação à chapa que materializa a RN. As coordenadas geodésicas das estações rastreadas foram calculadas pelo IBGE através do *software* científico Bernese 5.2. Cenas desses levantamentos podem ser vistas na Figura 8.

**Figura 8 – Medições GNSS em RRNN**



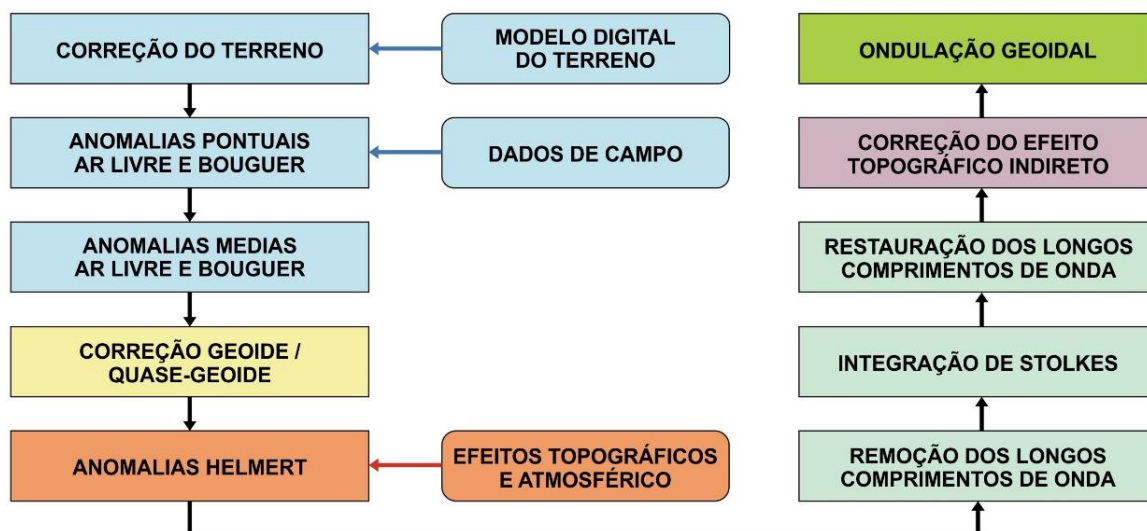
**Fonte:** Acervo do autor

#### **4 Metodologia usada na elaboração do MODGEO-GO**

O cálculo do MODGEO-GO considerou como ferramenta principal o pacote computacional canadense SHGEO - *Stokes-Helmert GEOid software*, elaborado na década de 1980 pelo Departamento de Geodesia e Geomática da Universidade de New Brunswick (Ellman, 2005a; 2005b). Seguindo tendência adotada em diversos países, inclusive no Brasil, o MODGEO-GO foi concebido com base na fórmula de Stokes, considerando assim a mesma sistemática usada no MAPGEO2015. Foge ao

escopo deste trabalho o detalhamento de toda a formulação envolvida no processo. Entretanto, o fluxograma apresentado na Figura 9 permite uma visão geral do processo.

**Figura 9** – Etapas da elaboração de um modelo geoidal



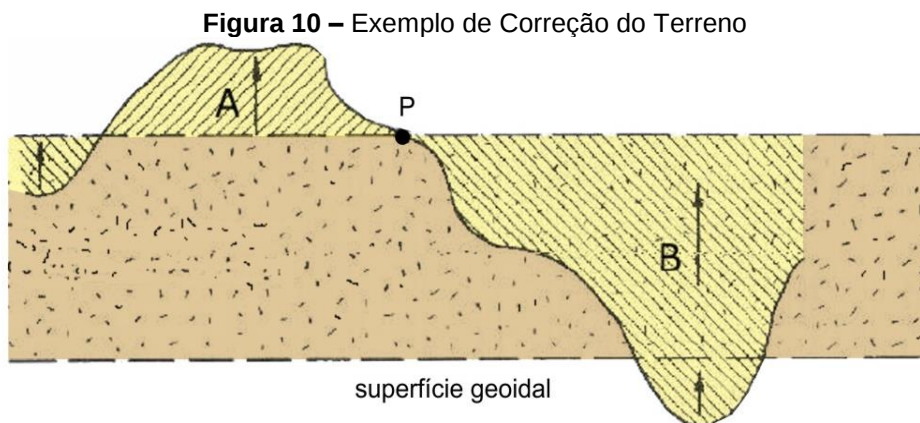
**Fonte:** Modificado de Blitzkow et al., 2016

A estação de trabalho onde o SHGEO está instalado pertence à EPUSP e foi acessada remotamente desde a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), devidamente credenciada para uso desse pacote computacional, em janeiro de 2017. As principais fases envolvidas no processamento serão delineadas e pormenorizadas com o intuito de oferecer uma visão abrangente de como um modelo geoidal gravimétrico é elaborado.

#### 4.1 Cálculo da correção do terreno

A correção gravimétrica do terreno, ou efeito direto do relevo topográfico, mais conhecida pela denominação genérica Correção de Terreno (CT), leva em consideração o efeito causado pelas irregularidades do relevo (Piña, 2000). Através da CT, o efeito das irregularidades da superfície topográfica, nas circunvizinhanças das EEGG, passa a ser devidamente corrigido (Lobianco, 2005). O cálculo da CT foi efetuado em toda a região a ser modelada através do aplicativo `dte_dp.c`, do próprio SHGEO. Para tanto, levou em consideração, além das altitudes ortométricas e as anomalias pontuais ar livre das EEGG, o MDT SAM3s\_v2 e dois MDTs derivados com 5' e 30" de resolução.

Essa CT, disponibilizada em miligals (mGal), será aplicada nas anomalias processadas nas etapas posteriores do SHGEO. A Figura 10 exemplifica hipoteticamente uma CT para uma estação *P*, mostrando as faixas *A* e *B* que serão corrigidas.



Fonte: Modificado de Matos, 2005

#### 4.2 Anomalias pontuais de ar livre e Bouguer

De acordo com Guimarães (2010), anomalia de gravidade ( $\Delta g$ ) é a diferença entre o valor de  $g$ , medido na superfície física e reduzido à superfície geoidal através de uma correção específica  $C_g$ , e o valor de gravidade normal na superfície elipsoidal ( $\gamma$ ), obtido por fórmulas apropriadas em função da latitude da estação. A conceituação e formulação envolvidas na determinação da gravidade normal podem ser vistas em Gemael (1999). Luz (2008), acrescenta que as anomalias retratam as heterogeneidades da Terra Real em relação à Terra Normal. Genericamente são expressas em mGal por meio da expressão (2):

$$\Delta g = g + C_g - \gamma \quad (2)$$

Existem vários tipos de anomalias de gravidade, que variam em função da correção gravimétrica aplicada aos valores de aceleração de gravidade observados (Lobianco, 2005). Dentre as  $\Delta g$  existentes, serão evidenciadas aquelas que possuem estreita relação com os mencionados métodos de redução, devidamente aplicados no processamento do MODGEO-GO: ar livre, Bouguer e Helmert.

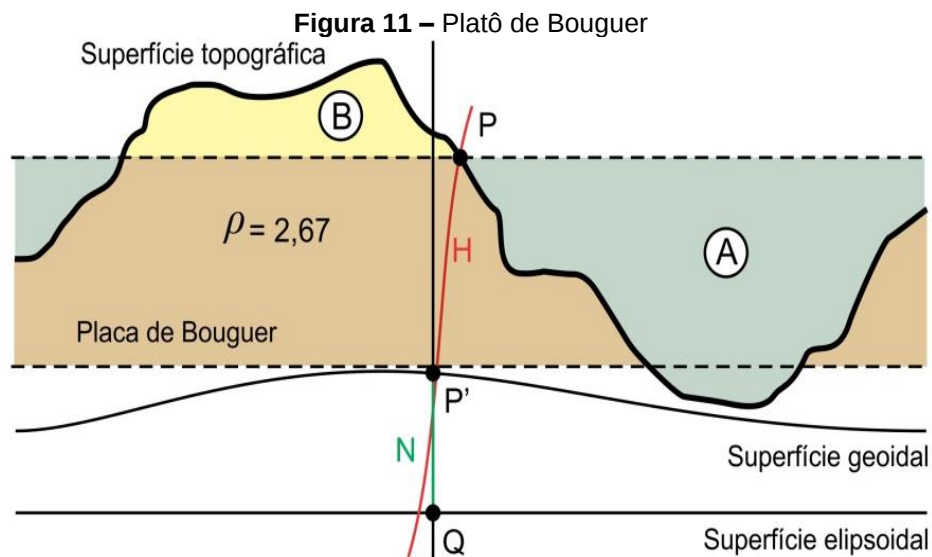
A anomalia de ar livre ( $\Delta g_{AL}$ ) leva em conta a correção de mesmo nome ( $C_{AL}$ ) que considera basicamente o gradiente vertical de gravidade, desde a superfície física até a superfície geoidal. Portanto, as  $\Delta g_{AL}$  correlacionam a altitude ortométrica com

um valor médio de variação da gravidade na Terra Normal e a latitude da estação subentendida em  $\gamma$ , conforme mostra Gemael (1999), por meio da expressão 3.

$$\Delta g_{AL} = g + C_{AL} - \gamma \quad (3)$$

onde:  $C_{AL} = 0,3086 \times H$

A segunda anomalia calculada é conhecida pelo nome do cientista francês Pierre Bouguer (1698 - 1758). Esta considera, além da  $\Delta g_{AL}$ , as massas topográficas existentes entre a superfície geoidal e a superfície física da Terra. A anomalia Bouguer é derivada da correção homônima, que remove as massas continentais a partir da premissa de que a área circunvizinha à EG é uma placa plana e horizontal de densidade constante ( $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$ ) e espessura igual à altitude ortométrica da EG, denominada platô ou placa de Bouguer (Gemael, 1999). A Figura 11 traz uma representação esquemática do platô de Bouguer.



Fonte: Modificado de Lobianco, 2005

Lobianco (2005) discorre sobre a possibilidade de se considerar três anomalias Bouguer, advindas das respectivas correções. A anomalia Bouguer simples ( $\Delta g_{BS}$ ) provém da correção Bouguer simples ou incompleta ( $C_{BS}$ ) e corresponde à componente vertical da atração exercida pelo platô de Bouguer. A correção Bouguer completa ( $C_{BC}$ ) permite obter a anomalia Bouguer completa ( $\Delta g_{BC}$ ), correlacionando a  $\Delta g_{BS}$  com a  $\Delta g_{AL}$ . Há ainda a correção Bouguer refinada ( $C_{BR}$ ) que acrescenta à  $C_{BC}$  a CT, originando a Anomalia de Bouguer Refinada ( $\Delta g_{BR}$ ), através da expressão 4.

$$\Delta g_{BR} = g + C_{BR} - \gamma \quad (4)$$

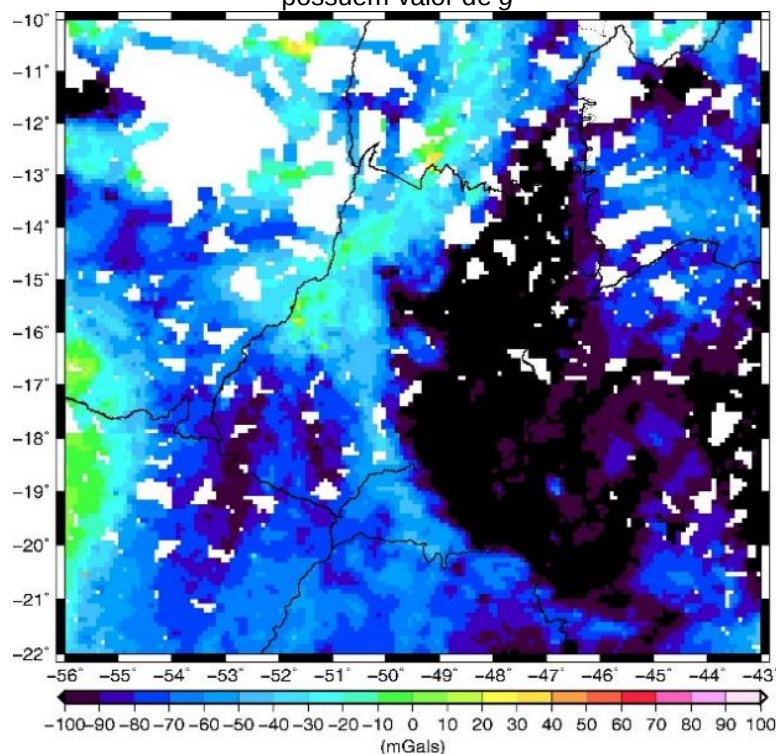
Complementando, cabe ressaltar que a razão de ser deste cálculo é sintetizada pelo oportuno comentário de Goldani (2006), explicando que a anomalia Bouguer não tem aplicação direta no processamento do geóide. No entanto, sua determinação se faz conveniente por possuir variações mais suaves do que as anomalias de ar livre. Em outras palavras, as anomalias Bouguer permitem a interpolação e obtenção das anomalias médias ar livre com maior propriedade.

#### **4.3 Cálculo das anomalias médias de Bouguer**

O SHGEO pressupõe que os dados e insumos de entrada estejam dispostos em células. Isso foi assegurado no *download* dos MGGs e deve ser levado em conta também nos arquivos utilizados e gerados durante o processamento. Em decorrência, às anomalias auferidas nas fases pregressas foi dado tratamento similar, considerando uma grade de 5' x 5'. O programa usado para efetuar as interpolações das anomalias pontuais foi desenvolvido pela EPUSP e denomina-se script Grade5m.sh. O script utiliza ferramentas computacionais do Generic Mapping Tools (GMT), disponível em: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>. Assim, os arquivos de saída das anomalias Bouguer foram divididos em dois, contendo as longitudes, latitudes das EEGG em ambos, e anomalias Bouguer simples e completa em cada uma das partes separadas. Após as interpolações pelo Grade5m.sh, os valores pontuais das anomalias foram transformados em valores médios para o centro de cada célula de 5'.

O passo seguinte foi dado com o uso de outro programa, o Script Prench5m.sh, também oriundo da EPUSP, para atribuir o valor zero às quadrículas onde não há informações de gravidade, e consequentemente de anomalias pontuais Bouguer. Através do cartograma constante na Figura 12 é possível visualizar a distribuição das anomalias médias completas de Bouguer na região do MODGEO-GO.

**Figura 12** – Anomalia Bouguer completa em grade de 5'. As áreas na tonalidade branca não possuem valor de  $g$



Fonte: O autor

#### 4.4 Cálculo das anomalias médias ar livre

A anomalia média ar livre subsidia diretamente o cálculo da anomalia de Helmert. À semelhança do que ocorreu na etapa anterior, essas novas anomalias ar livre representam um valor médio para cada uma das 22.464 quadrículas existentes na região modelada. O programa empregado também pertence ao pacote computacional SHGEO e é denominado Fair.c, em alusão à denominação original *Free Air*. Os dados de entrada consistem nas anomalias médias de Bouguer simples e completa, MDT e CT. O arquivo resultante deste processamento é composto pelas coordenadas dos centros das quadrículas mencionadas, acrescido do cálculo das anomalias médias ar livre, utilizando as anomalias Bouguer simples e completas e, ainda, a diferença entre estas duas grandezas.

#### 4.5 Cálculo da correção geóide – quase geóide

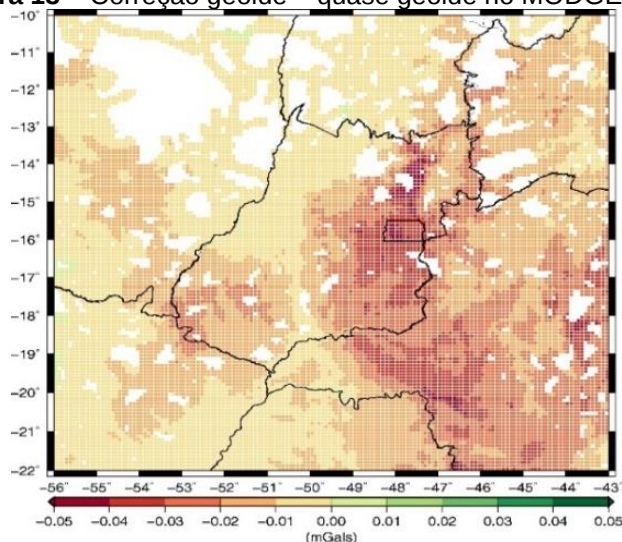
Um modelo geoidal gravimétrico calculado através das fórmulas de Stokes requer a inexistência teórica de massas externas à superfície geoidal. Para tanto existe a necessidade de se aplicar os chamados métodos de redução, ou correções gravimétricas, a fim de que tais massas topográficas sejam desconsideradas (Gemael, 1999). Em termos matemáticos, as citadas reduções eliminam os efeitos das massas

topográficas sobre os valores observados de  $g$  (id., ibid.). Esse processo de aplicação das correções gravimétricas é também denominado Regularização da Terra (Blitzkow, 2004).

Os métodos de redução envolvidos na Regularização da Terra levam em conta as anomalias da gravidade que, por conseguinte, utilizam em suas fórmulas o gradiente ar-livre da Terra normal, coincidente com a  $C_{AL}$ , para reduzir as observações gravimétricas da superfície física à superfície do geoide. Esse processo é denominado "continuação para baixo (*downward continuation*)". No entanto, ao considerar tal gradiente ( $0,3086H$ ), o que acaba ocorrendo é a redução à superfície do quase geoide, que serve de referência às altitudes normais (Freitas & Blitzkow, 1999).

Como no cálculo das anomalias de Helmert, realizado na próxima etapa, são usadas altitudes ortométricas ao invés das altitudes normais, há a necessidade da correção entre as superfícies geoidal e quase geoidal, correlacionando as mencionadas altitudes ortométricas e normais. Os dados utilizados para a correção geoide - quase geoide foram as anomalias ar livre resultantes do programa Fair.c em conjunto com o MDT SAM3s\_v2, devidamente inseridos no programa Geoid\_quasigeoid\_cor.c (Tenzer & Vaníček, 2003). Os resultados são expressos por um arquivo texto contendo as longitudes, latitudes e as correções propriamente ditas para o centro de cada quadrícula de 5'. Embora essa correção não tenha sido considerada no MAPGEO2015, optou-se pela sua aplicação diante dos valores máximos alcançados, na faixa de 0,05 mGal. A Figura 13 apresenta um cartograma que espelha a magnitude de tais correções no MODGEO-GO.

**Figura 13 – Correção geoide – quase geoide no MODGEO-GO**



Fonte: O autor

#### 4.6 Cálculo das anomalias de Helmert

O método de condensação desenvolvido por Friedrich Robert Helmert (1843-1917) pressupõe que as massas topográficas sejam condensadas em uma camada de espessura desprezível sobre o geoide, de tal forma que a massa da Terra não sofra alterações (Guimarães, 2010). Conforme acrescenta Blitzkow (2004), esse método é aplicado segundo duas etapas básicas:

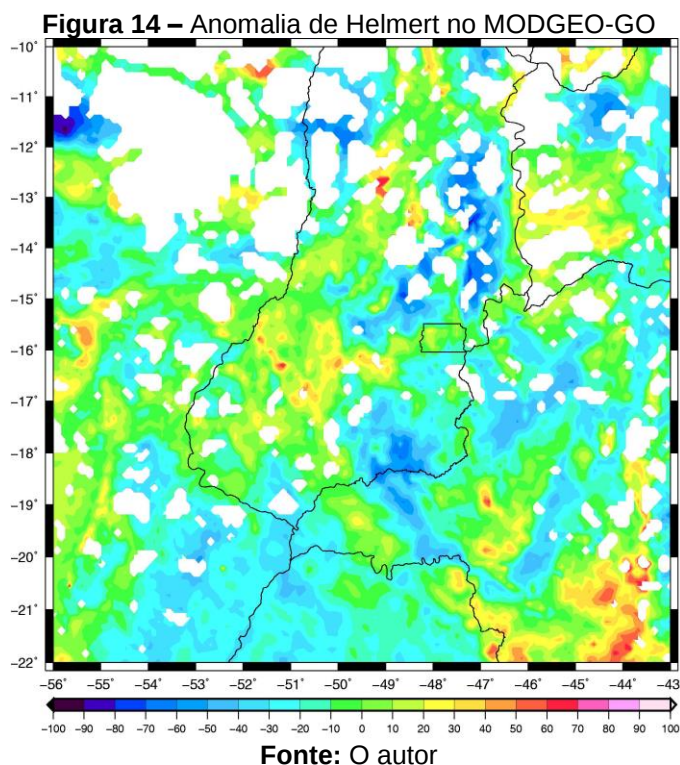
1ª Substituição do efeito das massas topográficas sobre  $g$  pelo efeito da camada superficial sobre o geoide.

2ª Redução de  $g$  medido na superfície física ao geoide através da  $C_{AL}$ .

As anomalias de Helmert ( $\Delta g^h$ ) (equação 5), foram processadas através do programa em linguagem C denominado Surf\_anomaly.c. Essa é a última anomalia de gravidade que o pacote SHGEO calcula, utilizando-se dos seguintes dados (Ellman, 2005b):

$$\Delta g^h(r_t, \Omega) = \Delta g(r_t, \Omega) + \delta A^t(r_t, \Omega) + \frac{2}{r_t(\Omega)} \delta V^t(r_t, \Omega) + \delta A^a(r_t, \Omega) \quad (5)$$

onde:  $\Delta g(r_t, \Omega)$  é a anomalia média ar livre;  $\delta A^t(r_t, \Omega)$  é o efeito topográfico direto (DTE - *Direct Topographical Effect*);  $\frac{2}{r_t(\Omega)} \delta V^t(r_t, \Omega)$  é o efeito topográfico indireto secundário (SITE - *Secondary Indirect Topographical Effect*); e  $\delta A^a(r_t, \Omega)$ , o efeito atmosférico direto (DAE - *Direct Atmospheric Effect*). O efeito topográfico direto (DTE) na gravidade é uma quantidade residual. Este é obtido subtraindo a atração gravitacional das massas topográficas condensadas da atração das massas topográficas. Analogamente, o efeito atmosférico direto (DAE) da gravidade é a atração gravitacional da atmosfera toda menos a atração gravitacional da atmosfera condensada. O efeito direto é obtido pela derivada radial dos potenciais topográfico e atmosférico residuais (ELLMAN & VANÍČEK, 2007). O efeito topográfico indireto secundário (SITE) origina-se devido à aplicação da correção topográfica na anomalia de gravidade. O seu valor numérico é sempre negativo e pequeno, podendo crescer ligeiramente em regiões montanhosas (ELLMAN & VANÍČEK, 2007). O resultado gráfico da Anomalias de Helmert é visto na Figura 14.



#### 4.7 Remoção dos longos comprimentos de onda

As informações referentes aos longos comprimentos de onda dos MGG utilizados (EIGEN-6C4, GOCO05c e GECO), até o grau e ordem 200 e 250, foram extraídas das anomalias de Helmert através do programa Remove, concebido e usado no âmbito da EPUSP. Tal programa faz uso da sub-rotina de obtenção do potencial da Terra ( $W$ ) desenvolvida por Tscherning (1976). Esse procedimento serve para que o cálculo da integral de Stokes seja realizado somente com as informações gravimétricas terrestres. Naquelas quadrículas onde não se dispunha dessas anomalias, assumiu-se o valor zero. As respostas provenientes do Remove para cada quadrícula de 5', resumidas num arquivo texto, constituíram-se de longitudes, latitudes, valores removidos dos longos comprimentos de onda e valores dos médios e curtos comprimentos de ondas das anomalias de Helmert.

#### 4.8 Integração de Stokes

O primeiro procedimento adotado nesta fase consistiu na transformação do arquivo texto, resultante do programa Remove, em um arquivo matricial. Isso foi conduzido pelo programa Geragr.c, também desenvolvido na EPUSP, com vistas a facilitar o esforço computacional envolvido no processamento da integral de Stokes. O programa gera uma grade de valores da anomalia média e inclui um cabeçalho com

informações sobre a grade para utilização no programa FFTMOD. Assim o arquivo de entrada composto por 22.464 linhas deu origem a uma matriz de 144 linhas por 156 colunas. O cálculo da integral de Stokes foi realizado pelo programa FFTMOD (LI & SIDERIS, 1993) elaborado em FORTRAN.

A expressão de Stokes, representada em (6) e detalhada posteriormente, é utilizada para a obtenção da ondulação geoidal ( $N$ ) correspondente às coordenadas geocêntricas  $\Omega (\phi, \lambda)$ . Considera  $R$  o raio médio da Terra;  $r$  o raio geocêntrico;  $S^M(\psi_0, \psi(\Omega, \Omega'))$  o núcleo modificado de Stokes;  $\psi(\Omega, \Omega')$  denota a distância esférica entre o ponto a ser calculado e os pontos de integração;  $\Delta g(r_g, \Omega)$  representa a anomalia gravimétrica residual;  $d\Omega'$  retrata a área do elemento de integração; e, o último termo  $\frac{\delta V^t(r_g, \Omega)}{\gamma_0(\phi)}$  é a correção do efeito topográfico indireto primário (Ellmann & Vaníček, 2007).

$$N(\Omega) = \frac{R}{4\pi\gamma_0(\phi)} \iint_{\Omega_{\psi_0}} S^M(\psi_0, \psi(\Omega, \Omega')) \Delta g(r_g, \Omega) d\Omega' + \frac{R}{2\gamma_0(\phi)} \sum_{n=2}^M \frac{2}{n-1} \Delta g_n^h(r_g, \Omega) + \frac{\delta V^t(r_g, \Omega)}{\gamma_0(\phi)} \quad (6)$$

sendo a anomalia gravimétrica residual sobre o geoide expressa por (7):

$$\Delta g(r_g, \Omega) = \left( \Delta g^h(r_T, \Omega) - \sum_{n=2}^M \Delta g_n^h(r_g, \Omega) \right) \quad (7)$$

O FFTMOD é um programa interativo, requerendo informações sobre o objetivo, sistema operacional usado, método de cálculo e raio de integração, durante o processamento. Dentre essas perguntas que subsidiam o FFTMOD, cabe destaque específico ao raio de integração. Nesse sentido, Guimarães (2010), explica que a formulação original de Stokes concebia a integração de dados gravimétricos, e consequentemente das anomalias de gravidade, em todo o planeta Terra. Entretanto isso é contornado, na prática, através da adoção de um MGG e da modificação do núcleo da integral de Stokes (*Kernel de Stokes*), visando restringir a área de integração. No MODGEO-GO foi levado em conta um raio limitante de  $1^\circ$ , utilizando o núcleo de Stokes modificado  $S^M(\psi_0, \psi(\Omega, \Omega'))$ , proposto por Featherstone (2003), definido como uma combinação da modificação do núcleo de Stokes (Vaníček & Kleusberg, 1987), juntamente com a de Meissl (1971).

Os resultados deste processamento estão referenciados ao co-geoide residual de Helmert e são traduzidos por uma matriz contendo as ondulações provenientes da integral de Stokes, denominadas ondulações residuais ou co-geoidais ( $N^C$ ), representadas na Figura 15.

Adicionalmente, o FFTMOD fornece uma síntese com as estatísticas do processamento das ondulações co-geoidais residuais e das anomalias de Helmert removidas dos longos comprimentos de onda. Complementando a presente etapa, foi efetuada a transformação da matriz oriunda do processamento com o FFTMOD em um arquivo ASCII contendo 22.464 linhas, com as longitudes, latitudes e  $N^C$  correspondentes às quadrículas. Tal transformação foi realizada pelo programa em FORTRAN `grd2xyz.f`, desenvolvido pela EPUSP.

#### 4.9 Restauração dos longos comprimentos de onda

Neste passo, a ação consistiu em restaurar as informações referentes aos longos comprimentos de onda dos MGG que tinham sido anteriormente removidas. Com esse intuito utilizou-se o programa *Restaura*, igualmente elaborado no âmbito da EPUSP e que faz uso da subrotina de obtenção do potencial da Terra ( $W$ ) desenvolvida por Tscherning (1976). O programa repõe a parcela referente aos longos comprimentos de ondas na altura geoidal residual. O resultado do programa *Restaura* é disponibilizado através de um arquivo ASCII, com informações sobre  $\phi$ ,  $\lambda$ , altura geoidal e, ainda, altura geoidal dos longos e médios comprimentos de onda altura co-geoidal final, obtida da soma das duas anteriores.

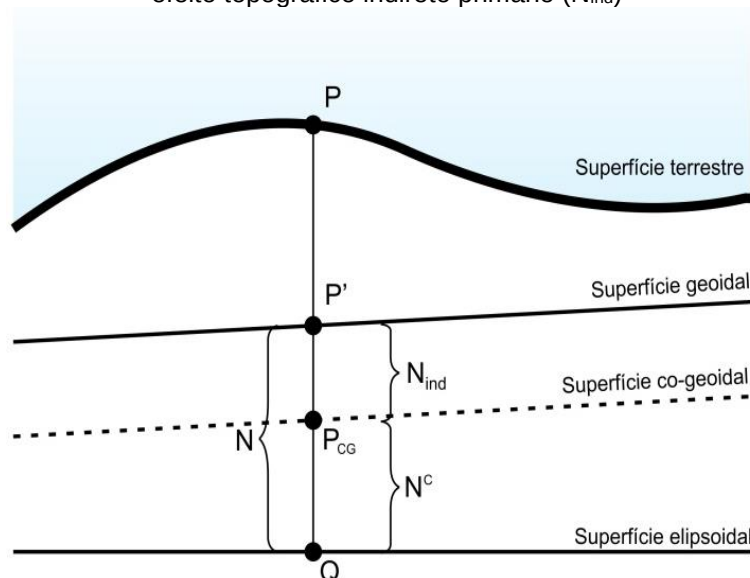
Nesta etapa houve a aplicação do termo de ordem zero ( $N_0$ ) igual a -0,41m, à semelhança do que foi adotado pelas últimas versões da série MAPGEO (id., ibid.) O valor de  $N_0$  traduz as alturas geoidais, que estão referenciadas a um elipsoide médio da Terra em valores que são referenciados ao WGS84 (Guimarães, 2010).

#### 4.10 Correção do efeito topográfico indireto

A última fase empreendida no cálculo do MODGEO-GO corresponde à obtenção das ondulações geoidais. Isso é procedido através da adição da parcela da ondulação  $N_{ind}$ , referente ao efeito topográfico indireto primário (PITE - *Primary Indirect Topographical Effect*) às alturas ou ondulações co-geoidais, referidas ao “geoide fictício”. O PITE é obtido apor meio do cálculo dos potenciais gravitacionais das massas topográficas e condensadas, ambos referidos ao nível do geoide

(ELLMAN & VANÍČEK, 2007). O programa utilizado para tal transformação integra o pacote SHGEO e possui a denominação de PITE.cc. Na Figura 15 é possível visualizar as grandezas representativas do efeito topográfico indireto primário e da ondulação co-geoidal na composição da ondulação geoidal.

**Figura 15** – Elementos envolvidos na composição da ondulação geoidal: ondulação co-geoidal ( $N^C$ ) e efeito topográfico indireto primário ( $N_{ind}$ )

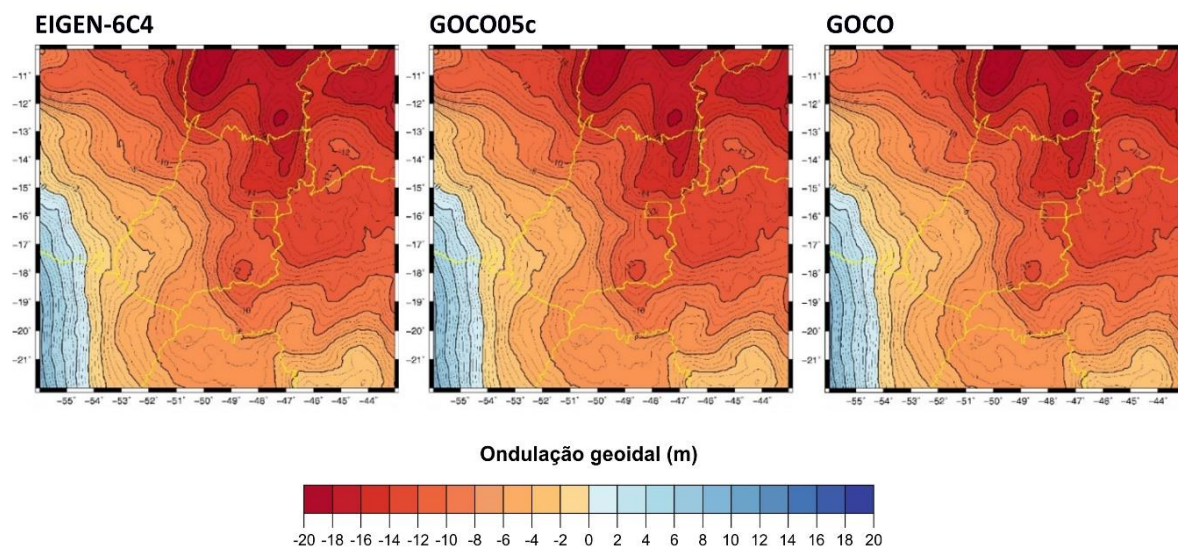


Fonte: Modificado de Matos, 2005

## 5 Resultados e Discussão

Os resultados finais do MODGEO-GO, obtidos após as dez etapas computadas, são graficamente apresentados pelos cartogramas que compõem a Figura 16. Através desses cartogramas é possível ver os resultados correspondentes a cada um dos MGG adotados: EIGEN-6C4, GOCO05c e GECO. A simples análise visual dos cartogramas permite constatar a similaridade entre os três modelos geoidais. Tais semelhanças são devidas à tênue variação da altura geoidal na região e às equidistâncias de 1m entre as isolinhas. O fato de os modelos serem muito parecidos dá indícios de que os correspondentes processamentos foram exitosos e convergentes.

**Figura 16** – MODGEO-GO calculado com os MGGs: A) EIGEN-6C4; B) GOCO05c e C) GECO



Fonte: O autor

Embora tenha havido acentuada semelhança entre as três versões do MODGEO-GO, originárias de MGGs diferentes, isso não assegura que tais modelos estejam consistentes. A maneira usual de se avaliar a consistência e convergência de um modelo geoidal gravimétrico está correlacionada com a comparação das ondulações geoidais oriundas do modelo e aquelas obtidas diretamente pelas diferenças entre as altitudes geodésicas, advindas de receptores GNSS, com as altitudes ortométricas fornecidas por estações altimétricas da RAAP. Assim, no intuito de validar o MODGEO-GO, foram ocupadas 140 RRNN com receptores geodésicos, segundo os procedimentos mencionados em 3.4. Posteriormente houve a comparação entre os resultados auferidos por esses dois processos e decorrentes análises estatísticas para cada um dos MGGs adotados. Na seleção das estações altimétricas da RAAP tomou-se o cuidado de considerar apenas aquelas RRNN que pertenciam a circuitos fechados, com altitudes ajustadas, onde foi possível obter os respectivos desvios padrão.

A consistência do MODGEO-GO pode ser evidenciada pelos valores numéricos expressos no quadro comparativo da tabela 2. Esses dados denotam as discrepâncias absolutas pontuais entre as ondulações geoidais das 140 estações ocupadas e as ondulações obtidas através dos três modelos calculados, considerando graus e ordens 200 e 250. A tabela também compara as discrepâncias com os resultados do MAPGEO2015.

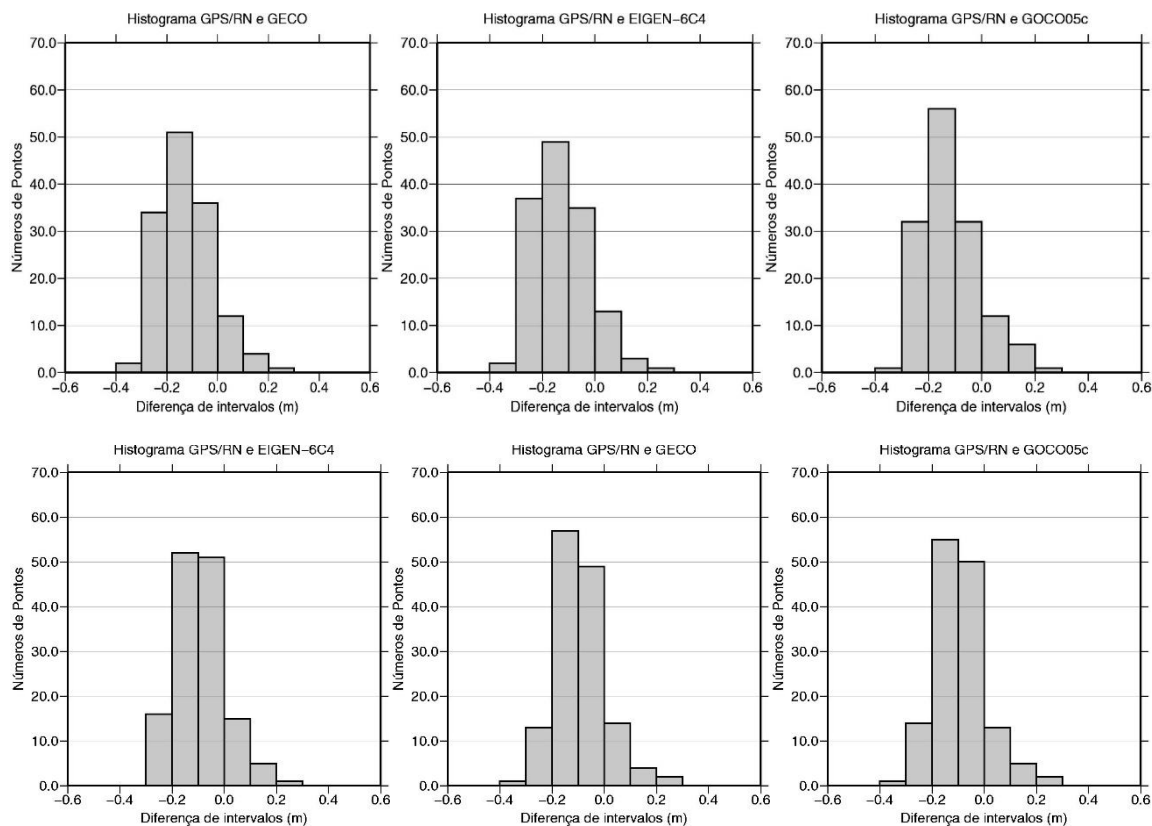
**Tabela 2** – Comparação entre as ondulações geoidais das 140 RRNN com os modelos geoidais calculados e o MAPGEO2015, evidenciando melhores resultados com grau e ordem 250

| Modelo Geoidal                      | Média        | Dif. padrão | Máx.        | Min.         |
|-------------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| GEOID-GO EIGEN-6C4 (200)            | -0,12        | 0,16        | 0,22        | -0,30        |
| <b>GEOID-GO EIGEN-6C4 (250)</b>     | <b>-0,09</b> | <b>0,13</b> | <b>0,26</b> | <b>-0,29</b> |
| GEOID-GO GECO (200)                 | -0,12        | 0,16        | 0,20        | -0,34        |
| GEOID-GO GECO (200)                 | -0,09        | 0,13        | 0,23        | -0,32        |
| GEOID-GO GOCO05c (200)              | -0,12        | 0,16        | 0,23        | -0,34        |
| GEOID-GO GOCO05c (250)              | -0,09        | 0,13        | 0,24        | -0,34        |
| <b>MAPGEO2015 (EIGEN-6C4 (200))</b> | <b>-0,09</b> | <b>0,14</b> | <b>0,31</b> | <b>-0,37</b> |

Pela tabela observa-se, na primeira coluna, a média aritmética das diferenças pontuais entre as ondulações geoidais mencionadas, seguidas das diferenças padrão médias, máximas e mínimas nas colunas subsequentes. Emprega-se o conceito de “diferença padrão” ao invés do “erro médio quadrático” (RMS error - *Root Mean Square error*), devido ao fato de que os valores das ondulações comparadas advêm de grandezas independentes e com origens distintas, tendo em vista que as ondulações geoidais advindas do GNSS e RAAP possuem caráter puramente geométrico, enquanto as oriundas do MODGEO-GO têm conotação física vinculada ao campo de gravidade da Terra (Guimarães, 2010).

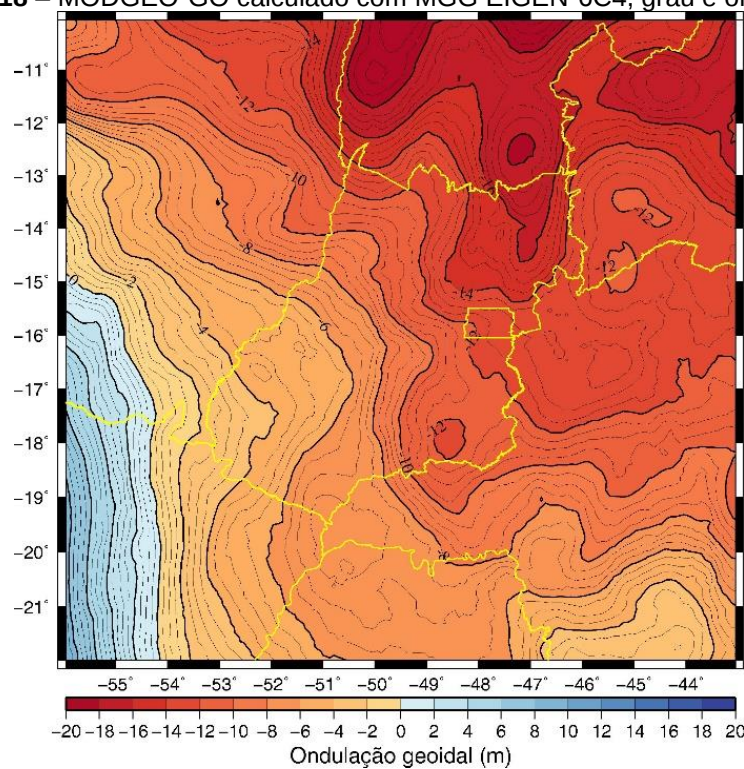
Outro forte indício de que o MODGEO-GO está consistente em termos estatísticos é denotado pela estreita similaridade entre os histogramas correspondentes a cada um dos MGG empregados no processamento. Os gráficos inseridos na Figura 17 consideram graus e ordens 200 na parte superior e 250 nas figuras posicionadas abaixo. Mostram ainda que a maioria das estações GNSS/nivelamento possuem diferenças entre  $\pm 0,20$  m. Observa-se também um deslocamento do histograma, em termo de distribuição normal, função do valor da média ser negativo ( $\sim -0,12$  m).

**Figura 17** – Histogramas das discrepâncias auferidas nas estações (GNSS/RN) usadas na avaliação do MODGEO-GO para os três MGGs. Na parte superior utilizando até grau e ordem 200. Na parte inferior grau e ordem 250



Fonte: O autor

Devido à convergência observada pelas análises estatísticas contidas na tabela 1 e nos histogramas apresentados, retratando a desejável similaridade entre os três modelos, seria plenamente possível a adoção de qualquer uma das versões calculadas. Entretanto, conforme já mencionado, optou-se pela alternativa que usou o MGG EIGEN6C4, com graus e ordens 250, por ter sido a mesma adotada pelo MAPGEO2015 e por apresentar menores diferenças padrão. A Figura 18 mostra com maior detalhamento a opção escolhida para Goiás.

**Figura 18** – MODGEO-GO calculado com MGG EIGEN-6C4, grau e ordem 250

Fonte: O autor

Após essa escolha foi possível proceder à avaliação do MODGEO-GO diante do último modelo geoidal nacional, considerando a divisão regional brasileira. Destarte, pelos valores mostrados na tabela 3, cotejando o novo modelo geoidal de Goiás com os resultados obtidos nas cinco grandes regiões do país pelo MAPGEO2015, a consistência do MODGEO-GO fica ainda mais evidente.

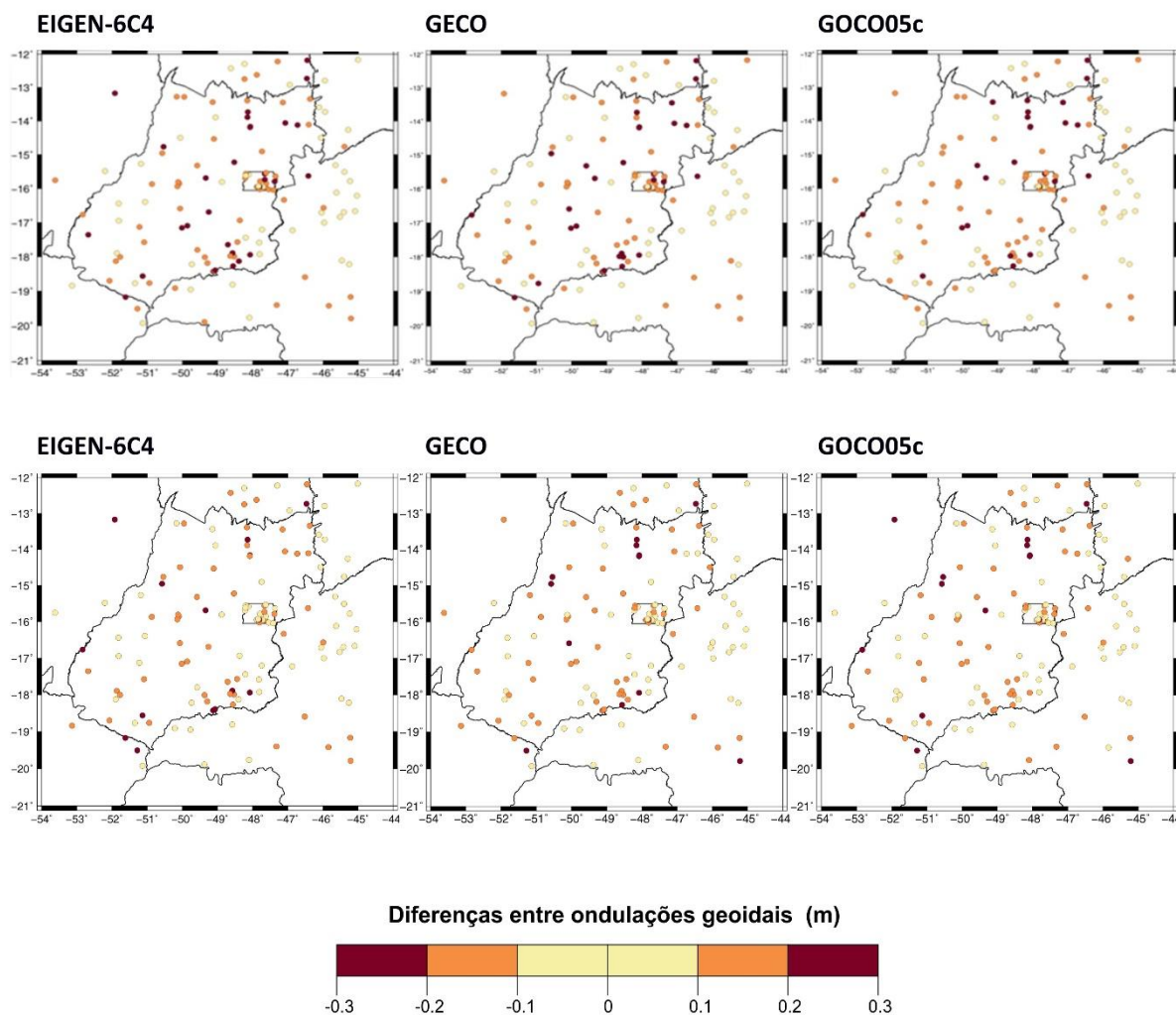
**Tabela 3** – Comparações entre o MODGEO-GO e os resultados regionais do MAPGEO2015, em metros

|             | Norte | Nordeste | Centro-Oeste | Sudeste | Sul   | MODGEO-GO |
|-------------|-------|----------|--------------|---------|-------|-----------|
| Nº conexões | 21    | 229      | 94           | 288     | 60    | 140       |
| Média       | -0,14 | -0,04    | -0,08        | 0,06    | 0,11  | 0,09      |
| Dif. padrão | 0,25  | 0,17     | 0,16         | 0,15    | 0,18  | 0,13      |
| Dif. máxima | 0,39  | 0,47     | 0,49         | 0,46    | 0,33  | 0,26      |
| Dif. mínima | -0,48 | -0,49    | -0,34        | -0,28   | -0,41 | -0,29     |

Adicionalmente às grandezas estatísticas apresentadas foi conveniente efetuar uma avaliação espacial do MODGEO-GO. Por conseguinte, os cartogramas inseridos na Figura 19, cada qual correspondente a um MGG utilizado, tanto para graus e ordens 200, como 250, mostram a localização aproximada das 140 estações disponíveis e possibilitam deduções sobre as regiões onde o MODGEO-GO está mais vulnerável. Assim, através dessa análise visual, observa-se que as áreas de Goiás

com maior discrepância entre as diferenças padrão para os três modelos são praticamente as mesmas.

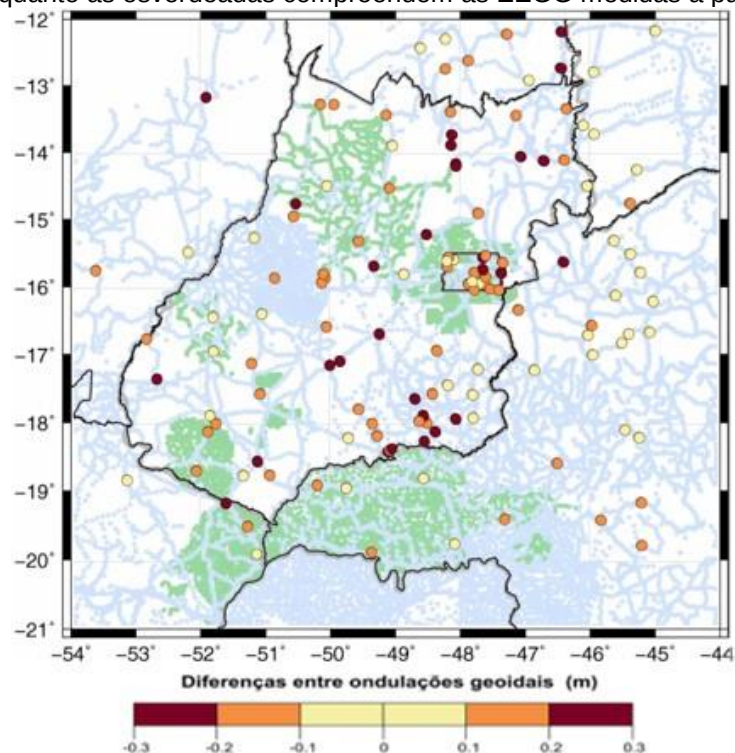
**Figura 19** – Discrepâncias da comparação das 140 GNSS/nivelamento com os modelos geoidais calculados para graus e ordens 200, na parte superior, e 250, na parte inferior



Fonte: O autor

Indo mais adiante nessa avaliação, depreende-se que as regiões com diferenças padrão mais acentuadas quase sempre coincidem com as áreas mais carentes de informações gravimétricas terrestres. A Figura 20 traz uma interessante superposição do arcabouço gravimétrico utilizado no cálculo do MODGEO-GO com as 140 RRNN medidas diretamente. Subliminarmente a figura indica quais deverão ser as prioridades gravimétricas para os próximos anos no estado de Goiás.

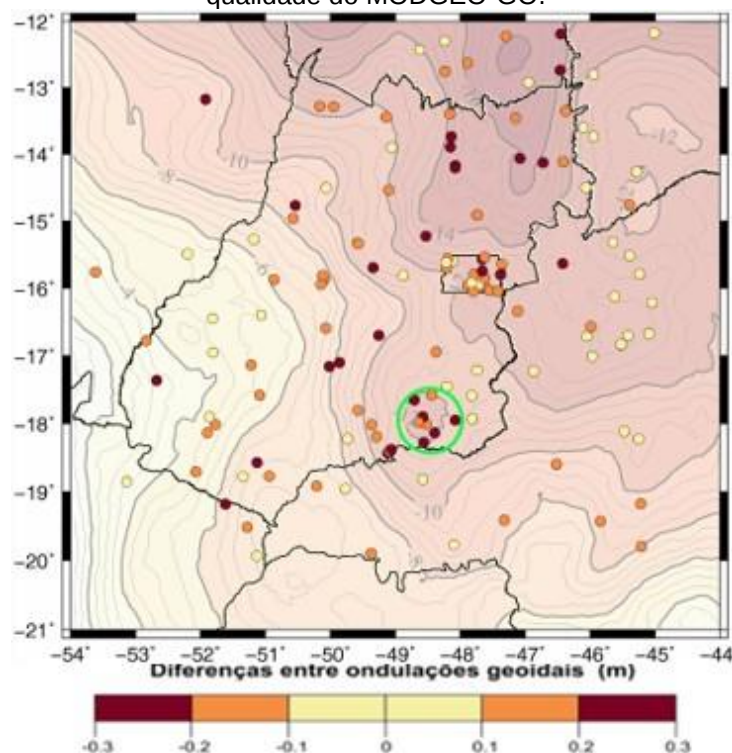
**Figura 20** – Correlação entre as diferenças padrão das 140 estações GNSS/nivelamento com a densidade de densificação gravimétrica existente. A coloração azulada representa as EEGG mais antigas enquanto as esverdeadas compreendem as EEGG medidas a partir de 2013



Fonte: O autor

As análises visuais possibilitaram também a identificação de um caso curioso onde, apesar das informações gravimétricas disponíveis, ainda há discrepâncias que merecem a devida atenção. Isso ocorreu no sul do estado, nas circunvizinhanças da Serra de Caldas Novas, devido, provavelmente, à estrutura geológica local, composta basicamente por rochas de altas densidades. Em razão disso houve, no final de 2016, a reocupação de diversas RRNN nessa região, visando uma avaliação mais minuciosa. Os resultados auferidos por tais medições revelam diferenças-padrão que variam entre 0,1 e 0,3 m, apontando para a necessidade de maior densificação de EEGG e, possivelmente, de estudos complementares na região em questão. A Figura 21 denota essa atipicidade ao apresentar os resultados das estações de controle medidas na região; percebe-se, ademais, a semelhança do contorno da isolinha modelada com a conformação topográfica da Serra de Caldas Novas.

**Figura 21** – Diferenças padrão auferidas nas estações de controle medidas na região da Serra de Caldas Novas (circundada em verde) denotando possível influência geológica na conformação e na qualidade do MODGEO-GO.



Fonte: O autor

## 6 Considerações Finais

Diante do exposto é possível constatar que o MODGEO-GO produziu resultados alvissareiros e coloca Goiás na linha de frente da Geodesia brasileira. Cabe assinalar que os resultados auferidos pelo MODGEO-GO, de ordem decimétrica, dificilmente poderiam ser melhores, em razão de que as RRNN integrantes da RAAP, usadas para avaliação e validação do modelo, possuem, em Goiás, uma precisão que varia entre 7 e 8 cm (IBGE, 2017).

A expressiva quantidade de 32446 estações gravimétricas utilizadas na modelagem, validadas por um número não menos expressivo de 140 estações de controle, possibilitarão à comunidade usuária a obtenção de altitudes mais precisas e condizentes com as necessidades modernas.

Os modelos com grau e ordem 250 ficaram ligeiramente mais consistentes do que os modelos com grau e ordem 200. Isso pode ser explicado pelos expressivos resultados disponibilizados pela missão GOCE, que permitiram modelar a forma da Terra com maior acurácia. Função disso, quando são utilizados os coeficientes dos modelos derivados do GOCE, até grau e ordem 250, consegue-se obter as melhores informações que esses modelos podem oferecer.

É intenção dos autores disponibilizar o MODGEO-GO no portal do Instituto Mauro Borges (IMB), com vistas a facilitar a consulta *on line* dos usuários. Além disso, a continuada densificação gravimétrica empreendida em Goiás nos anos subsequentes permitirá o cálculo de futuras versões do modelo com possíveis ganhos qualitativos.

Agradecimentos. Complementando, é imprescindível externar os agradecimentos aos pesquisadores Denizar Blitzkow e Ana Cristina Cancoro de Matos pela disponibilização do pacote computacional SHGEO, cessão de dados e significativas contribuições ao presente artigo.

### Referências bibliográficas

BLITZKOW, D. 2004 **Sistemas Altimétricos e Determinação do Geóide. Apostila de Geodésia Física - PTR-5797**. Curso de Pós-graduação da Escola Politécnica da USP. São Paulo. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/ptr/lgt/FTP/Geodesia-fisica-06.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2017.

BLITZKOW, D., MATOS, A.C.O.C., GUIMARÃES, G. N., PACINO, M. C., LAURIA, E. A., NUNES, M. A., CASTRO JUNIOR, C.A.C., FLORES, F., GUEVARA, N. H., ALVAREZ, R. & HERNANDEZ, J. N. 2016. **Gravity and Geoid Model for South America**. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2016, Viena. EGU Proceedings Viena. Disponível em: <<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-1626.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

BLITZKOW, D, & FREITAS, S.R.C. 1999. Altitudes e Geopotencial. **IGeS Bulletin – International Geoid Service**. Milão. 9, 47-62.

CASTRO JÚNIOR, C. A. C. **Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul**. São Paulo, 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, USP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-27072007-150539/>>.

ELLMANN, A. 2005a. SHGEO software packages-An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation, **Reference Manual I**, 36 p.

ELLMANN, A. 2005b. SHGEO software packages-An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation, **Reference Manual II**, 43 p.

ELLMANN, A. & VANÍČEK, P. 2007. UNB application of Stokes-Helmert's approach to geoid computation, **Journal of Geodynamics**, 43, 200-213.

FEATHERSTONE, W.E. 2003. Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination, **Computer & Geosciences**, 29, 183-193. Disponível em: <http://www.iamg.org/index.php>. Acesso em: 10 dez. 2016.

FECHER, T., PAIL, R. & GRUBER, T. 2016. **The combined gravity field model GOCO05c**. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2016, Viena. EGU Proceedings Viena. Disponível em: <<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7696.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

FÖRSTE, C., BRUINSMA, S.L., ABRİKOSOV, O., FLECHTNER, F., MARTY, J.C., LEMOINE, J.M., DAHLE, C., NEUMAYER, H., BARTHELMES, F., KÖNIG, R., & BIANCALE, R. 2014. **EIGEN-6C4: The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse**. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2016, Viena. EGU Proceedings Viena. Disponível em: <<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7696.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

FÖRSTE, C., BRUINSMA, S.L., ABRİKOSOV, O., LEMOINE, J.M., SCHALLER, T., GÖTZE, H. J., EBBING, J., MARTY, J.C., FLECHTNER, F., BALMINO, G. & BIANCALE, R. 2006. A mean global gravity field model from the combination of satellite mission and altimetry/gravimetry surface data – EIGEN-GL04C. **Geophysical Research Abstracts**. 8.

GEMAEL, C. 1999. **Introdução à Geodésia física**. Curitiba, 302f. Editora da Universidade Federal do Paraná.

GILADIRNO, M., REGUZZONI, M. & SAMPIETRO, D. 2016. GECO. A global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. **Studia Geophysica et Geodaetica**. 60(2), 228–247.

GOLDANI, D. 2006. **Modelo geoidal de alta resolução para o estado do Paraná: aplicação da transformada rápida de Fourier – Stokes e do valor do potencial do geoide na definição da superfície de referência vertical**. Curitiba, 129p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

GUIMARÃES G.N. 2010. **A altimetria e o modelo geoidal no Estado de São Paulo**. São Paulo, 119p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, G. N. 2013. **A geoid model in the state of São Paulo: an attempt for the evaluation of different methodologies**. São Paulo, 144p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, G.N., MATOS, A.C.O.C. & BLITZKOW, D. O quase-geoide do estado de São Paulo e a avaliação dos modelos recentes do GOCE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 8, Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/979/1084>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

INDE. Infraestrutura Nacional De Dados Espaciais. 2017. **Portal SIG Brasil. Visualizador da INDE (VINDE)**. Disponível em <<http://www.visualizador.inde.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. **Descritivos de Referências de Nível do estado de Goiás**. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sgb.shtm>>. Acesso em: 13 jul 2017.

LI, Y., & SIDERIS, M. 1993. Estimation and minimization of geoid undulation errors, In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY GENERAL MEETING. Beijing, China, **IAG Proceedings**.

LOBIANCO, M.C.B. 2005. **Determinação das alturas do geoide no Brasil**. São Paulo, 165p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LUZ, R.T. 2008. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. Curitiba, 207p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

MATOS, A.C.O.C. 2005. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de Geodésia e Geofísica na América do Sul**. 355p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MATOS, A.C.O.C., & BLITZKOW, D. 2008 Modelagem Digital de Terrenos (MDT) de 3" para a América do Sul **Relatório de Pós-Doutorado**. Período: março de 2007 a fevereiro de 2008. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 38p.

MATOS, A.C.O.C., & BLITZKOW, D. 2009. Refinamento do Modelo Digital de Terreno (MDT) de 3" de arco para a América do Sul. **Relatório de Pós-Doutorado**. Período: março de 2008 a fevereiro de 2009. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 27p.

MATOS, A.C.O.C., BLITZKOW, D., GUIMARÃES, G.N.; LOBIANCO, M.C.B. & COSTA, S.M.A. 2012. Validação do MAPGEO2010 e comparação com modelos do geopotencial recentes. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, 18(1),101-122. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bcg/v18n1/a06v18n1.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2017.

MATOS, A.C.O.C., BLITZKOW, D., MACHADO, W.C., NUNES, M.A., LENGROBER, N.V., XAVIER, E.M.L. & FORTES, L.P.S. MAPGEO2015: o novo Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, 68(10) 1873-1884 Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/1802>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

MEISSL, P. 1971. **Preparations for the Numerical Evaluation of Second-Order Molodensky-Type Formulas**. Ohio State University Report, 163, Columbus, USA.

MIRANDA, F.A. 2006. **Contribuição para Análise do Campo da Gravidade na Região do Datum Vertical Brasileiro**. Curitiba, 136p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

MONICO, J.F.G. 2008. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 472p.

NICACIO JUNIOR, E.L. **Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira**. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 228 f.: il. color.; 30 cm. Curitiba, 2017.

PIÑA, V.H.S. 2000. **A Determinação de um Modelo Geoidal de Precisão para o Uruguai**. Curitiba, 165p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

SILVA, M.A. 2002. **Obtenção de Um Modelo Geoidal para o Estado de São Paulo**. São Paulo, 156p. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SILVA, D.V.R. **Determinação de um Modelo Geoidal Local para o Distrito Federal**. 76 páginas. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Observatório Sismológico.

SCHWARZ, K.P., SIDERIS, M.G. & FORSBERG, R. 1987. Orthometric heights without leveling. **Journal of Surveying Engineering**, 113(1) 28-40.

TENZER, R. & VANÍČEK, P. 2003. Geoid-Quasigeoid Correction in Formulation of the Fundamental Formula of Physical Geodesy. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 55. Disponível em: <<http://www2.unb.ca/gge/Personnel/Vanicek/GeoidQuasigeoidCorrection.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

TSCHERNING, C.C.: On the Chain-Rule Method for Computing Potential Derivatives. **Manuscripta Geodaetica**, Vol.1, pp. 125-141, 1976.

VANÍČEK, P. & KLEUSBERG, A. 1987. The Canadian geoid-Stokesian approach. **Manuscripta Geodaetica**, 12(2), 86-98.

VANÍČEK, P., SANTOS, M. S., TENZER, R. & NAVARRO, A. H. 2003. Algunos aspectos sobre alturas ortométricas y normales. **Revista Cartográfica**, 76/77, 9-86. Disponível em: <<http://www2.unb.ca/gge/Personnel/Vanicek/AlgunosAspectos.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

## **APÊNDICE 5**

### **INTEGRAÇÃO DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL NO AJUSTE DO MODELO GEOIDAL PARA O ESTADO DE GOIÁS**

## INTEGRAÇÃO DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL NO AJUSTE DO MODELO GEOIDAL PARA O ESTADO DE GOIÁS

JOÃO PAULO MAGNA JÚNIOR<sup>1</sup>  
CARLOS ALBERTO CORREA E CASTRO JUNIOR<sup>2</sup>  
NILSON CLEMENTINO FERREIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG  
Câmpus Goiânia – Área de Geomática, Goiânia - GO  
joao.paulo@ifg.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás - UFG  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia - GO  
{correaecastrojr, nclferreira}@gmail.com

**RESUMO** – A altitude obtida a partir dos Sistemas Globais de Navegação por Satélites (*Global Navigation Satellite System – GNSS*), puramente matemática (geométrica) não tem relação com a gravidade ou com o geóide e sim com a figura geométrica do elipsoide. No entanto, nas atividades de Engenharia e Ciências Cartográficas há interesse na altitude ortométrica associada ao geóide, que tem significado físico e está associada à gravidade. Os modelos geoidais possibilitam o cálculo de altitudes ortométricas a partir das altitudes geométricas obtidas por GNSS. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibiliza um modelo de ondulação geoidal para o Brasil denominado MAPGEO2015, calculado a partir de estações gravimétricas terrestres. As estações pertencentes à Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) em conexão com pontos de satélite (SAT), que possuem tanto a altitude ortométrica quanto a geométrica conhecidas, são utilizadas para validação do MAPGEO2015. Nessa pesquisa é apresentada uma estratégia para associar estações da RAAP na estimativa do modelo geoidal do Estado de Goiás. Utilizando funções baseadas em *Thin-Plate Splines* foi possível estimar coeficientes de um modelo matemático em que a contribuição das estações da RAAP melhorou em cerca de 30% a concordância entre as altitudes conhecidas e as estimadas em estações de verificação.

**Palavras chave:** modelo geoidal, *Thin-Plate Spline*, altitude, geóide.

**ABSTRACT** – The height obtained by the Global Navigation Satellite Systems is mathematical (geometric) and has no relation with the gravity or the geoid, but yes with the geometric form of the ellipsoid. However, the activities of engineering and cartographic sciences needs the orthometric height associated to the geoid, that have physical meaning and is associated to the gravity. The geoidal models allow the computation of orthometric height by using the geometric height obtained by GNSS. The Brazilian Institute for Geography and Statistics (IBGE) provide a geoidal model from Brazil called MAPGEO2015, computed from terrestrial gravimetric stations. The stations from the High Precision Altimetric Network (RAAP), connected to the satellite points (SAT), that include both orthometric and geometric heights are used to validate the MAPGEO2015. The aim of this research is to present a strategy to associate stations from the RAAP to the geoidal model from Goiás. By using Thin-Plate Splines functions was possible to estimates the coefficients of a mathematical model where the contribution of the RAAP stations increase in about 30% the agreement between the known and the computed heights in the verification stations.

**Key words:** geoidal model, Thin-Plate Splines, height, geoid.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas GNSS trouxeram grande avanço aos usuários de informação geoespacial, possibilitando alta produtividade e acurácia no posicionamento. Em termos de posicionamento altimétrico, o GNSS possibilita a determinação de altitudes (geométrica ou elipsoidal) associadas a um modelo geométrico (elipsoide) que não possui significado físico, ou seja, não tem relação com a gravidade. Grande parte das atividades nas áreas das Engenharias, Ciências Cartográficas, Ciências Ambientais dentre outras, necessitam de altitudes que tenham relação com uma superfície equipotencial do campo de gravidade. Dessa forma, tem se tornado cada vez mais importante o estudo e a determinação da superfície geoidal e, por consequência, a determinação de altitudes ortométricas ou normais.

A determinação de altitudes associadas diretamente ao geóide exige equipamentos de alto custo, como o gravímetro, e procedimentos rigorosos de cálculo e correções. É possível obter altitudes precisas realizando nivelamento geométrico a partir de estações da RAAP, denominadas Referências de Nível (RRNN). Entretanto, essa modalidade de obtenção está cada vez mais escassa, devido aos altos custos à destruição dos marcos. Uma alternativa é a obtenção de altitudes ortométricas a partir de altitudes geométricas obtidas por GNSS. Para tanto é necessário que se tenha um modelo de ondulação geoidal compatível.

O IBGE disponibiliza o modelo de ondulação geoidal denominado MAPGEO2015. Para o cálculo do modelo geoidal foram utilizados pontos gravimétricos coletados no Brasil e em outros países do continente, que constam no banco de dados gravimétricos da América do Sul, pertencente à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) (IBGE, 2015).

As estações da RAAP não são utilizadas no cálculo do MAPGEO2015, algumas delas que fazem conexão com pontos de satélite (SAT) são usadas na avaliação do modelo. As estações de conexão com pontos SAT possuem altitude ortométrica, obtida por nivelamento geométrico, e altitude geométrica, obtida por posicionamento por satélite. Dessa forma, é possível calcular a ondulação (altura) geoidal pela diferença entre a altitude geométrica e a ortométrica. As diferenças entre as ondulações geoidais determinadas nessas RRNN e as ondulações calculadas a partir do MAPGEO2015, permitem estimar a qualidade do modelo geoidal.

O presente trabalho pretende investigar se a utilização conjunta dos dados gravimétricos com as estações da RAAP pode melhorar a qualidade do modelo geoidal. Para tanto, foi implementado computacionalmente um modelo matemático que utiliza funções baseadas em *Thin-Plate Splines* (TPS).

A formulação TPS possibilita determinar coeficientes que simulam uma fina placa de metal suspensa por pontos de controle, que varia suavemente no espaço. Trata-se de uma função contínua que gera um modelo analítico com transição suave entre as diferentes regiões modeladas. Apesar de ser um modelo de interpolação

global, o uso das funções de base radiais faz com que haja grande influência do comportamento local dos dados. Dessa forma, uma vez que se tenha o modelo geoidal convencional, calculado utilizando os dados gravimétricos, é possível incorporar estações altimétricas com ondulação geoidal conhecida, fazendo com que o modelo original se ajuste suavemente a essas novas estações.

## 2 THIN-PLATE SPLINES

As funções TPS apresentam características que as tornam aplicáveis em grande parte dos problemas de modelagem. A grande maioria das aplicações que utilizam Thin-Plate Splines está voltada à modelagem de superfícies, registro de imagens e estudos de deformações em imagens médicas. Destacam-se algumas pesquisas, tais como: interpolação de superfícies a partir de dados irregularmente distribuídos (YU, 2001; BORKOWSKI; KELLER, 2005); geração de grades altimétricas a partir de curvas de nível (GOUSIE, 1998); modelagem de distorções na rede geodésica (MAGNA JÚNIOR; CAMARGO; GALO, 2014).

Uma superfície TPS é composta por uma transformação linear e uma componente de distorções não lineares. O conceito de TPS se baseia na minimização da energia de curvatura de uma placa delgada de metal fixa a alguns pontos amostrais. Sua formulação garante restrições de que a superfície interpolante apresente mínima energia de deformação e que seja suave. De acordo com Bookstein (1989), para uma placa delgada de metal, sujeita a uma curvatura suave, a energia de curvatura em um ponto com coordenadas  $(x, y)$  é dada por:

$$I_f = \iint_{R^2} \left( \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)^2 \right) dx dy \quad (1)$$

A função *spline*  $f(x,y)$  que minimiza a energia de curvatura  $I_f$  é dada pela Equação 2:

$$f(x,y) = a + bx + cy + \sum w_i U(r), \quad (2)$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $w_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) são coeficientes da função TPS;  $U(r)$  é uma função de base radial; e  $r$  é a distância do ponto  $(x, y)$  ao  $i$ -ésimo ponto de controle.

A função *Thin-Plate Splines* é formada através de combinação linear de funções radiais ( $U(r)$ ), onde os valores da função são obtidos pelas diferenças (ou distâncias) entre as coordenadas dos pontos de controle (utilizados na geração do modelo). A função de base radial  $U(r)$  apresenta um comportamento linear à medida que os pontos analisados se afastam da origem, a qual é dada pelos pontos de controle. Assim, embora sejam funções de interpolação globais, as influências das deformações locais tendem a diminuir com o afastamento em relação ao ponto de controle, conforme destaca Castanho (1997).

A base das análises e da formulação da TPS está no estudo de uma função de base radial  $U$  dada pela Equação 3 para o caso tridimensional.

$$z(x, y, z) = U(r) = \|r\|_2 \quad (3)$$

onde  $r$  é a distância euclidiana definida pelas coordenadas de cada ponto de controle e é dada pela norma-2 de  $r$  na Equação 3.

A combinação linear de múltiplos termos de  $U(r)$  é utilizada para modelar uma placa delgada de metal que se estende em todas as direções, conforme a definição de TPS.

A Equação 2, adaptada em função das ondulações geoidais e para o espaço tridimensional é dada por:

$$N(x, y, z) = a_1 + a_x x + a_y y + a_z z + \sum_{i=1}^n w_i U(r_i) \quad (4)$$

onde  $N(x, y, z)$  é a ondulação geoidal;  $a_1$ ,  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  e  $w_i$  são coeficientes a serem determinados;  $U(r)$  é a função de base radial; e  $r_i$  é a distância do  $i$ -ésimo ponto de controle ao ponto de avaliação.

Conforme apresentada na Equação 4 é necessária a determinação de  $n+4$  coeficientes e, assim, cada ponto com ondulação geoidal conhecida proporciona uma equação. Para que o sistema seja possível é preciso acrescentar um conjunto de injunções que têm a função de garantir o crescimento linear da TPS à medida que o ponto de avaliação da função se torna mais distante de um ponto de controle. As injunções são apresentadas nas Equações 5, 6, 7 e 8.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 0, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i X_i = 0, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i Y_i = 0, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i Z_i = 0. \quad (8)$$

### 3 METODOLOGIA E EXPERIMENTOS

#### 3.1 Seleção dos dados

O conjunto de dados utilizado foi fornecido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e é composto por:

- Grid com espaçamento de 5' x 5' contendo 22464 pontos com coordenadas e valores de ondulação geoidal calculados utilizando o modelo combinado do campo de gravidade EIGEN-6C4; e
- Conjunto de 140 estações GNSS/RN as quais possuem valores de altitude ortométrica, obtidos por nivelamento geométrico e a altitude geométrica obtida por GNSS.

Os pontos foram selecionados de forma a recobrir todo o Estado de Goiás e se estender numa faixa de 10 minutos de arco além do seu limite. A Figura 1 apresenta a disposição dos pontos utilizados no processamento.

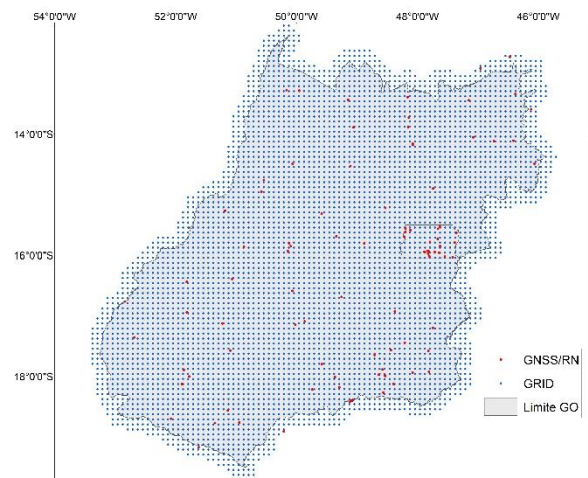


Figura 1 – Distribuição dos pontos do GRID e RN/GPS

Os valores de ondulação geoidal variaram de -1,983 m a -17,789 m, com um valor médio de -9,833 m. A Figura 2 apresenta a variação da ondulação geoidal ao longo do Estado de Goiás.

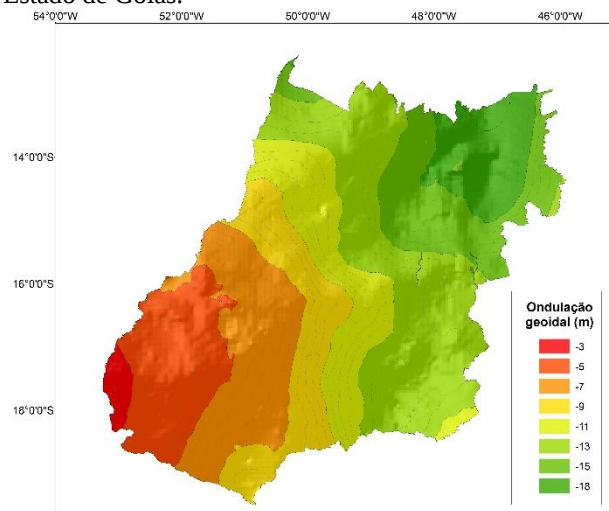


Figura 2 – Ondulação geoidal no Estado de Goiás

#### 3.2 Estimativa dos coeficientes TPS

Cada ponto do grid e cada estação GNSS/RN possibilita uma equação  $N(x, y, z)$  (Equação 4). O conjunto dessas equações associado às equações de injunção (Equações de 5 a 8) forma um sistema de  $n+4$  equações (onde  $n$  é o número de pontos utilizados). Com esse sistema é possível determinar os  $n+4$  coeficientes TPS da Equação 4, ou seja,  $w_1, \dots, w_n, a_1, a_x, a_y$  e  $a_z$ .

Como não há redundância na determinação da solução do sistema e a matriz  $A$  (matriz dos coeficientes) é quadrada e de característica integral, o vetor dos coeficientes  $X$  (vetor das incógnitas) pode ser encontrado

pela multiplicação da matriz inversa dos coeficientes ( $A^{-1}$ ) e o vetor das observações ( $L$ ), na forma  $X = A^{-1}L$ .

### 3.3 Avaliação da qualidade do modelo geoidal sem a utilização de estações GNSS/RN

Utilizando as estações gravimétricas do grid foi realizado o processamento para estimar os coeficientes TPS. Uma vez determinados os coeficientes, a partir das coordenadas das estações GNSS/RN foi realizada a interpolação das ondulações geoidais.

Em seguida foram calculadas as diferenças (discrepâncias) entre as ondulações geoidais conhecidas (provenientes de nivelamento geométrico) e as ondulações interpoladas em cada estação GNSS/RN. Algumas estatísticas calculadas a partir das discrepâncias entre as ondulações geoidais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatísticas nas estações GNSS/RN

| Estatística | Discrepâncias absolutas (m) |
|-------------|-----------------------------|
| Mínimo      | 0,005                       |
| Máximo      | 0,297                       |
| Média       | 0,160                       |
| RMS         | 0,174                       |

Conforme apresentado na Tabela 1, o erro médio quadrático (*Root Mean Squared Error* – RMS) nas estações GNSS/RN é da ordem de 0,174 m. Esse valor é condizente com o RMS esperado pelo MAPGEO2015 que é de aproximadamente 0,17 m (IBGE, 2015).

### 3.4 Avaliação da qualidade do modelo geoidal com a utilização de estações GNSS/RN

Como forma de avaliar o comportamento do modelo geoidal com a inclusão de estações GNSS/RN foram realizadas cinco amostragens aleatórias dividindo o conjunto de dados em pontos de controle e pontos de verificação. Os pontos de controle (90% das estações GNSS/RN em cada amostragem) são usados, juntamente com os pontos do grid de estações gravimétricas, para estimar os coeficientes TPS. Os pontos de verificação (10% dos pontos GNSS/RN restante) são utilizados para verificar a qualidade do modelo mediante a comparação das ondulações originais com as estimadas (interpoladas).

A distribuição dos pontos de controle e de verificação para cada amostra é apresentada na Figura 3.

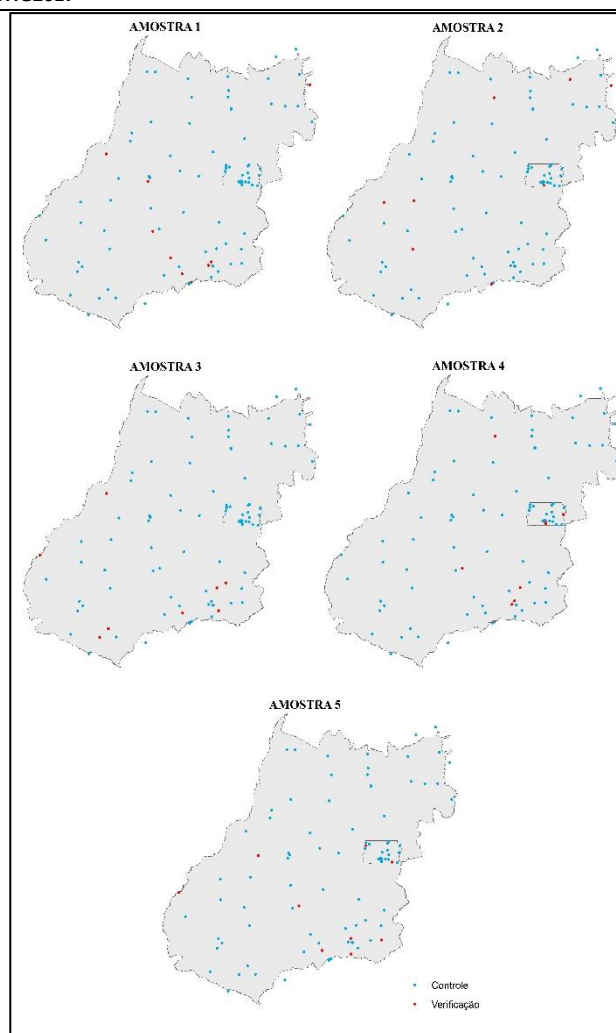


Figura 3 – Distribuição dos pontos de controle e verificação nas amostras.

O resultado das discrepâncias nos pontos de verificação para cada amostragem é apresentado pelas estatísticas contidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estatísticas das discrepâncias das amostras

| Estatística | Discrepância das Amostras (m) |       |       |       |       |
|-------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     |
| Mínimo      | 0,052                         | 0,025 | 0,028 | 0,025 | 0,006 |
| Máximo      | 0,296                         | 0,197 | 0,237 | 0,299 | 0,299 |
| Média       | 0,155                         | 0,110 | 0,133 | 0,167 | 0,160 |
| RMS         | 0,172                         | 0,125 | 0,150 | 0,186 | 0,103 |

Os valores de RMS e de discrepância média absoluta, encontrados nas amostras 1, 2, 3 e 5 (Tabela 2) foram inferiores aos valores obtidos sem considerar as estações GNSS/RN na modelagem (Tabela 1). Dessa forma, é possível inferir que a contribuição das estações GNSS/RN melhorou a concordância do modelo geoidal com as estações da rede altimétrica.

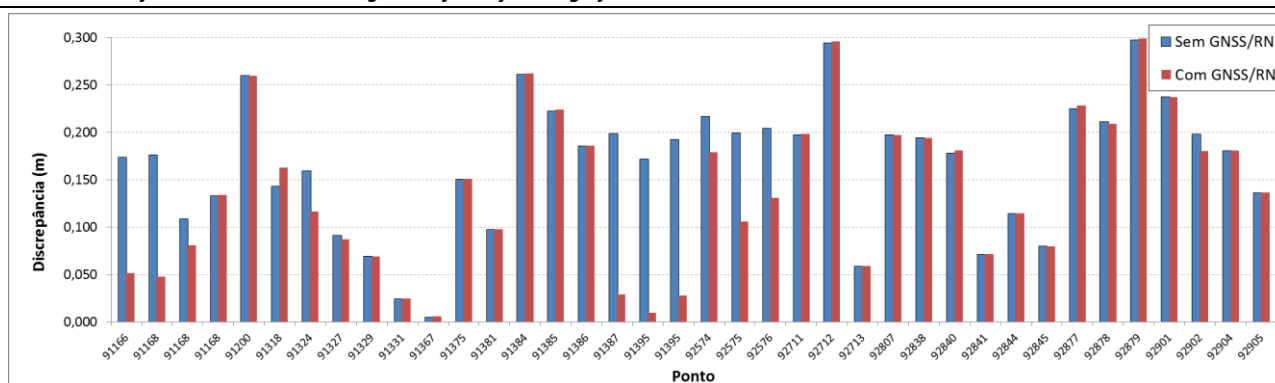


Figura 4 – Discrepâncias nos pontos de verificação antes e após o controle com GNSS/RN

Outra maneira de verificar a melhora dos resultados após a incorporação das estações GNSS/RN é comparar as discrepâncias nas estações que participaram como pontos de verificação no processamento inicial (sem estações GNSS/RN) e no processamento das amostras.

A Figura 4 apresenta a comparação entre as discrepâncias em 38 estações GNSS/RN antes e após a utilização de GNSS/RN no cálculo do modelo. É possível perceber que grande parte das estações tiveram as discrepâncias reduzidas no processamento das amostras. Uma análise numérica foi realizada identificando que houve uma redução de aproximadamente 33% nos valores das discrepâncias.

#### 4 CONCLUSÕES

O objetivo dessa pesquisa é verificar se é possível melhorar a qualidade do modelo geoidal a partir da integração da ondulação geoidal de estações da RAAP e da utilização de funções TPS. A formulação matemática TPS adaptada para trabalhar com dados de ondulação geoidal foi apresentada e discutida.

Experimentos foram realizados utilizando dados do MAPGEO2015 em Goiás juntamente com estações GNSS/RN e evidenciaram a melhora do modelo ao serem incorporadas estações da RAAP.

É importante destacar que a metodologia proposta parte do modelo geoidal já consolidado e calculado de maneira convencional. A incorporação das estações GNSS/RN é realizada a priori e o modelo é recalculado utilizando as funções TPS.

Dessa forma, é possível concluir que a metodologia proposta é promissora. No entanto, deve ser destacado que a contribuição das estações GNSS/RN depende da quantidade e da qualidade com que as ondulações são determinadas nessas estações, considerando, principalmente, as imprecisões inerentes à RAAP. De acordo com Luz e Guimarães (2001), em relação à RAAP, nas regiões mais distantes à origem altimétrica de Imbituba-SC, a propagação dos erros do nivelamento geométrico atinge valores elevados (13 cm na costa norte).

#### 5 REFERÊNCIAS

- BOOKSTEIN, F. L. Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 11, n. 6, p. 567-585, 1989.
- BORKOWSKI, A.; KELLER, W. Global and local methods for tracking the intersection curve between two surfaces. **Journal of Geodesy**, v. 79, p. 1-10, 2005.
- GOUSIE, M. B. Converting elevation contours to a grid. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, 8., 1998, Vancouver BC Canada. **Proceedings...** Burnaby: Depart of Geography, Simon Fraser University, 1998. p. 1-10.
- IBGE. **O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/modelos\_digitais\_de\_superficie/modelo\_de\_ondulacao\_geoidal/cartograma/rel\_mapgeo2015.pdf>. Acesso: 23 abril 2017.
- LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. **Realidade e perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. IN: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2., 2001, Curitiba.
- MAGNA JÚNIOR, J. P.; CAMARGO, P. O.; GALO, M. Transformação de coordenadas com modelagem de distorções entre SAD69 e SIRGAS2000 com o uso de Thin-Plate Splines. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 1, p. 19-38, 2014.