Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais 2018

IBGE
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Presidente da República
Michel Miguel Elias Temer Lulia

Ministro do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão
Esteves Pedro Colnago Júnior

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE

Presidente
Roberto Luís Olinto Ramos

Diretor-Executivo
Fernando José de Araújo Abrantes

ÓRGÃOS ESPECÍFICOS SINGULARES

Diretoria de Pesquisas
Claudio Dutra Crespo

Diretoria de Geociências
João Bosco de Azevedo (em exercício)

Diretoria de Informática
José Sant`Anna Bevilaqua

Centro de Documentação e Disseminação de Informações
David Wu Tai

Escola Nacional de Ciências Estatísticas
Maysa Sacramento de Magalhães

UNIDADE RESPONSÁVEL

Diretoria de Geociências

Coordenação de Geodésia
Sonia Maria Alves Costa

Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências
Coordenação de Geodésia

Relatório

Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais

REALT-2018

Rio de Janeiro
2018

Apresentação

A componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), isto é, o sistema de referência para medição de altitudes no território nacional, é realizado através de sua Rede Altimétrica de Alta Precisão, comumente denominada RAAP. Esta é formada pelas estações geodésicas altimétricas tradicionalmente denominadas Referências de Nível (RRNN), implantadas ao longo da malha viária por todo o território nacional. Os desníveis entre RRNN sucessivas são observados por meio do chamado nivelamento geométrico de alta precisão, permitindo que as altitudes de cada RN sejam obtidas com incerteza da ordem de poucos milímetros em relação às RRNN vizinhas. A reformulação dos procedimentos de análise e tratamento introduzida pela Coordenação de Geodésia do IBGE nos últimos três anos, apresentada neste Relatório, culmina com o cálculo e divulgação das mais rigorosas altitudes da RAAP, estabelecendo um novo nível de qualidade da informação vertical do SGB. Neste Relatório, são apresentados a metodologia desenvolvida para uma completa revisão da rede de circuitos e incorporação da informação gravimétrica aos desníveis nivelados, bem

como os resultados referentes ao reajustamento da RAAP em termos de seus números geopotenciais e a análise comparativa das novas altitudes normais em relação aos ajustamentos anteriores.

João Bosco de Azevedo
Diretor de Geociências

Sumário

1. Introdução 3
2. Antecedentes conceituais e históricos 4
2.1. Sistemas geodésicos de referência vertical 4
2.2. Altitudes físicas 5
2.3. Datum Vertical 9
2.4. Desenvolvimento espacial e cronológico da RAAP 10
3. Preparação do REALT-2018 12
3.1. Organização dos dados iniciais 12
3.2. Ferramentas computacionais utilizadas 15
3.2.1. Programa IDNOS 15
3.2.2. Programa Monta_INTCOBS 16
3.2.3. Programas GEOGRID e PREDGRAV 16
3.2.4. Programa INTCOBS_geopotencial 16
3.2.5. GHOST 17
3.2.6. Programa SIGMA_DESN_GHOST 18
3.3. Identificação preliminar das linhas internodais e análise temporal das estações ... 18
3.4. Fechamento e análise dos circuitos através das linhas internodais 19
3.5. Ajustamento da rede internodal 22
3.6. Ajustamentos preliminares da RAAP, análise e correção das novas inconsistências 23
3.7. Análise e correção de coordenadas planimétricas das estações 24
3.8. Interpolação dos dados de Gravidade 26
3.9. Cálculo dos números geopotenciais referentes aos Data de Imbituba e Santana .. 31
3.10. Cálculo das diferenças de número geopotencial 31
4. Cálculo dos Números Geopotenciais e Altitudes Normais 32
4.1. Ajustamento das diferenças de número geopotencial do bloco principal 32
4.2. Ajustamento do bloco principal com a Correção Normal-Ortométrica 37
4.3. Ajustamento das seções e/ou linhas desconsideradas após fechamento dos Circuitos 38
4.4. Ajustamento da Rede Altimétrica do Amapá 40
4.5. Análise, crítica e liberação das informações descritivas 42

5. Comentários finais e perspectivas 42
Referências 44
Equipe Técnica 46

1. Introdução

O Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é a referência para o posicionamento de alta precisão no território nacional. Para o posicionamento vertical – como no caso do estabelecimento de canais de irrigação e transposição de águas entre bacias hidrográficas, entre outros exemplos –, aquela referência é dada pelas estações da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do SGB, denominadas Referências de Nível (RRNN). À medida em que novas linhas de nivelamento são agregadas à RAAP e novas técnicas de medição e processamento são desenvolvidas, as altitudes de suas RRNN são periodicamente recalculadas, por meio do tradicional ajustamento por mínimos quadrados. Assim procedendo, o IBGE visa garantir a integridade, a consistência e a confiabilidade das informações divulgadas no seu Banco de Dados Geodésicos (BDG).

No ajustamento ora apresentado, foram considerados as observações da gravidade nas RRNN, para conversão dos desníveis observados em diferenças de geopotencial, visando a obtenção de altitudes com significado físico. Este é o resultado do trabalho de aproximadamente 2,5 anos da equipe do Projeto Densificação Altimétrica (DALTI) da Coordenação de Geodésia (CGED) do IBGE. Nos ajustamentos anteriores (IBGE, 2011), ainda não havia a possibilidade daquela conversão, em função da ausência de suficientes observações gravimétricas. Assim, apenas a correção do efeito sistemático do não paralelismo das superfícies equipotenciais foi aplicada aos desníveis observados, resultando em altitudes ortométricas-normais[1] (ou normais-ortométricas). Cumpre ressaltar que a utilização da gravidade normal (calculada), em substituição à gravidade real (medida), era procedimento padrão para os casos de cobertura gravimétrica insuficiente, já nas primeiras décadas do século XX (e.g., Bowie, Avers, 1914, p.51). Entretanto, para estes autores, tal aproximação não ensejava alteração da tipologia da altitude, mantendo-se a denominação ortométrica para as altitudes assim obtidas. O IBGE procedeu da mesma forma, desde o início do estabelecimento da RAAP.

[1] Denominadas nos canais de divulgação (BDG) e documentos do IBGE como ortométricas.

A decisão de realizar um novo ajustamento, iniciado em 2015, teve como principal justificativa a necessidade de modernização da componente vertical do SGB, em consonância com as recomendações científicas pertinentes (IAG, 2015), bem como de divulgação de altitudes com significado físico aos usuários do SGB, aliada à disponibilidade de observações de gravidade no Território Brasileiro.

O processo de organização e preparação dos dados da RAAP demandou o desenvolvimento de programas computacionais específicos para crítica dos dados, por meio dos quais foi assegurada a consistência entre todas as informações envolvidas. Para o ajustamento dos desníveis geopotenciais da Rede, foi mantido o software canadense GHOST, utilizado no ajustamento de 2011.

Ao longo deste relatório, são descritos todos os procedimentos executados durante o processo de ajustamento da RAAP: avaliação dos desníveis observados, interpolação dos valores da gravidade medida, análise dos fechamentos dos circuitos, e comparação dos resultados com os últimos ajustamentos, dentre outros.

2. Antecedentes conceituais e históricos

2.1. Sistemas geodésicos de referência vertical

Os elementos principais de um SGR vertical (SGRV) são as coordenadas verticais, isto é, as altitudes físicas ou números geopotenciais das estações da rede de referência, e a superfície de referência, ou nível de referência, a partir do qual são estabelecidas aquelas coordenadas verticais (IHDE et al., 2017). Tradicionalmente, a definição e realização dos SGRVs continentais e nacionais baseava-se na adoção do nível médio do mar (NMM) como datum vertical, considerado uma aproximação adequada do geoide, e na utilização exclusiva do nivelamento geométrico de alta precisão, com a correção da gravidade normal (teórica), para propagação desse datum em toda a região de interesse. Assim foi estabelecida a componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), conforme discutido a seguir.

2.2. Altitudes físicas

As altitudes físicas (H), e os números geopotenciais (C) que lhes servem de base, são as coordenadas adequadas para uso no posicionamento vertical, pois vinculam-se de forma rigorosa ao campo da gravidade e, por isso, respeitam o significado intrínseco dos conceitos “alto” e “baixo” associados ao fluxo de água (Luz, 2008, p.46). Em contraposição a estas coordenadas verticais, as chamadas altitudes geométricas ou elipsoidais (h), que resultam dos levantamentos GNSS, não mantêm qualquer vínculo com o campo da gravidade terrestre e, por isso, não são adequadas para uso no posicionamento vertical.

No nivelamento geométrico, o desnível entre dois pontos não é unívoco, pois depende do trajeto a ser considerado na respectiva medição. Mesmo com todo rigor no levantamento e sendo realizado um circuito, haverá uma diferença no fechamento deste. Esta tem origem no fato de que diferentes superfícies equipotenciais não são paralelas entre si nas posições niveladas, sendo as linhas de colimação dos níveis tangentes à superfície equipotencial do campo da gravidade no local (Freitas e Blitzkow, 1999).

Se, ao longo do nivelamento, for medida a gravidade em cada ponto, o número geopotencial pode ser obtido como:

$$C_P = W_0 - W_P = \int_0^P g \, dH \approx \sum_{i=1}^{K} \left(g_m^{obs} \, \Delta H^{obs} \right) \tag{1}$$

sendo C_P o número geopotencial de um ponto P qualquer, constituindo-se em uma grandeza física independente do trajeto entre O e P. Esta grandeza é unívoca e tem significado físico real na definição da altitude de P relativamente à superfície de referência. O número geopotencial é definido como a diferença entre o potencial da gravidade na superfície de referência (W_0) e no ponto considerado.

Na prática, é preferível o cálculo das diferenças de geopotencial ΔC_{AB}, desde que a distância entre os pontos A e B seja suficientemente pequena:

$$\Delta C_{AB} = C_B - C_A = -\left(W_B - W_A \right) \approx g_{AB}^{obs} \, \Delta H_{AB}^{obs} \tag{2}$$

cujo ajustamento resulta nos números geopotenciais.

A adoção direta do número geopotencial como descritor rigoroso da posição vertical não é adequada para a maioria dos usuários, devido à unidade em que os mesmos devem ser expressos (kilogal.metro ou m²/s²). A fim de contornar esta dificuldade, se faz necessária a conversão dos números geopotenciais em altitudes físicas, que são expressas em metros:

$$H^{física} = \frac{C}{G} \tag{3}$$

sendo G o valor específico de gravidade associado a cada tipo de altitude física.

Com foco nas atividades desenvolvidas para o Reajustamento Altimétrico (REALT) 2018, serão abordados apenas três tipos de altitudes físicas neste relatório.

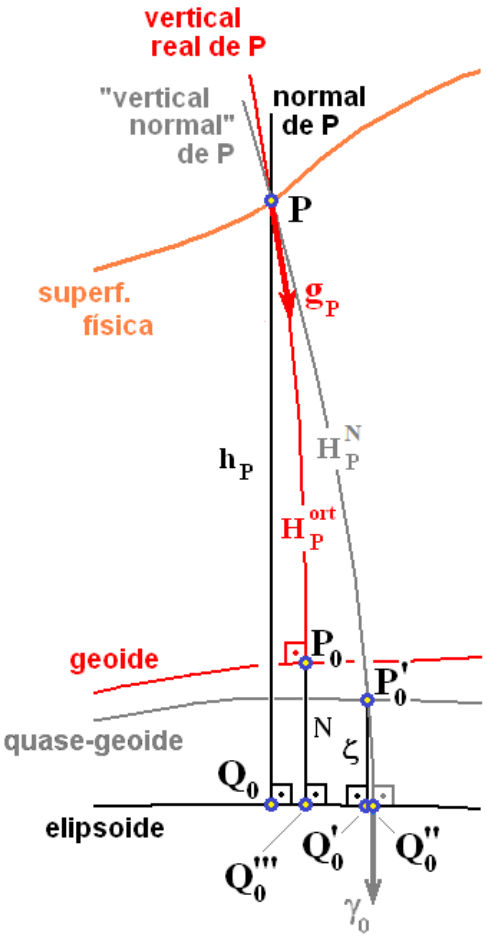

Figura 1 – Elementos envolvidos na definição das altitudes físicas; adapt. de Moritz (1980, pp. 9 e 13), Sideris (1994, p. 80) e Torge (2001, p. 216-217)

A altitude ortométrica é a distância medida entre o geoide e o ponto de interesse ao longo da linha vertical (Figura 1). Esta linha é ortogonal a todas as superfícies equipotenciais do campo da gravidade terrestre e, portanto, é uma curva reversa que reflete as irregularidades da distribuição de massas no corpo planetário. Para seu cálculo a partir do número geopotencial ajustado, o denominador da equação (3) deve ser o valor médio da gravidade real ao longo do mesmo percurso (g_{vert}), isto é, entre o geoide e o ponto de interesse:

$$C_P = \int g \, dH = g_m \int dH \quad \therefore \quad H_P^{ort} = \frac{C_P}{g_{vert}} \tag{4}$$

A observação da gravidade no interior da crosta é viável apenas em casos muito específicos e, portanto, para a maioria das estações altimétricas, deve-se considerar que é impossível o conhecimento da gravidade média na vertical e, consequentemente, da respectiva altitude ortométrica rigorosa. A fim de contornar esta dificuldade, a ciência geodésica propõe algumas variações e simplificações da definição formal de altitude ortométrica, baseadas em aproximações daquele valor médio da gravidade. Além disso, a distribuição deficiente de observações da gravidade na região de interesse pode comprometer a obtenção dos números geopotenciais e, portanto, das altitudes ortométricas rigorosas. Este foi o caso dos ajustamentos anteriores da Rede Altimétrica do SGB, em que não havia informação gravimétrica suficiente para o cálculo das respectivas diferenças de geopotencial. Naqueles casos, optou-se pela utilização da gravidade teórica ou normal, sem, contudo, alterar a qualificação das altitudes resultantes, seguindo o procedimento preconizado por Bowie e Avers (1914, p.51), isto é, mantendo a denominação como altitudes ortométricas. Modernamente, as altitudes obtidas desta forma são denominadas normais-ortométricas, ou ortométricas-normais (e.g. Krakiwsky, Mueller, 1965, p.109).

Assim, no caso do SGB, até 2017, eram disponibilizadas para os usuários as altitudes ortométricas do tipo normal das RRNN do SGB mas, a partir do reajustamento altimétrico aqui apresentado, o BDG disponibiliza altitudes normais, seguindo as recomendações do SIRGAS (2008, p.13).

Para o cálculo da altitude normal, é necessário obter o valor médio, ao longo da vertical, da gravidade normal (γ_{vert}), isto é, a gravidade teórica dada pelo chamado modelo Terra normal:

$$H^N = \frac{C}{\gamma_{vert}} \tag{5}$$

$$\gamma_{vert} = \gamma_0 \left[1 - \frac{H^N}{a} \left(1 + \alpha + m - 2\,\alpha\,\mathrm{sen}^2\varphi \right) + \left(\frac{H^N}{a} \right)^2 \right] \tag{6}$$

$$\gamma_0 = \gamma_a \frac{1 + k\,\mathrm{sen}^2\varphi}{\sqrt{1 - e^2\,\mathrm{sen}^2\varphi}} \quad , \quad k = \frac{b}{a}\frac{\gamma_b}{\gamma_a} - 1 \tag{7}$$

sendo a, b, m, α, γ_a e γ_b parâmetros associados ao sistema geodésico de referência (e.g., Luz, 2008, p.30).

A altitude normal é medida ao longo da linha vertical normal, isto é, a ortogonal às superfícies equipotenciais do campo normal. Por não considerar o campo real, a altitude normal não se refere rigorosamente ao geoide, mas sim a uma superfície próxima a ele, denominada quase-geoide (Figura 1).

Altitudes físicas e geométrica relacionam-se conforme as seguintes expressões, sendo N a altura geoidal, ζ a anomalia de altitude e Δg_B a anomalia Bouguer, aproximada pela diferença entre valores médios na vertical da gravidade real e normal (Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2006, p. 326):

$$N = h - H^{ort} \tag{8}$$

$$\zeta = h - H^N \tag{9}$$

$$\zeta = N - \frac{g_m - \gamma_m}{\gamma_m} H^{ort} \approx N - \frac{\Delta g_B}{\gamma_m} H^{ort} \tag{10}$$

$$H^N \approx \left(1 + \frac{\Delta g_B}{\gamma_m} \right) H^{ort} \tag{11}$$

Em resumo, a diferença conceitual entre as altitudes ortométrica, normal e normal-ortométrica reside no tipo de gravidade (real ou teórica) utilizado em duas

etapas distintas: no cálculo das diferenças de geopotencial com a equação 2 (gravidade na superfície física) e na conversão do número geopotencial final em altitude física (valor médio da gravidade ao longo da vertical). Para a altitude ortométrica rigorosa, utiliza-se a gravidade real nas duas etapas, enquanto que, para a altitude ortométrica-normal, emprega-se a gravidade normal em ambas as etapas. No caso das altitudes normais, aplica-se a gravidade real para o cálculo das diferenças de geopotencial e a gravidade normal para a obtenção da altitude.

2.3. Datum Vertical

No Brasil, existem atualmente dois *data* verticais, Imbituba e Santana, sendo ambos definidos e realizados do modo tradicional, isto é, a partir de um valor de NMM calculado com dados coletados em uma estação maregráfica e propagado por toda a região ou território de interesse por meio do nivelamento geométrico de alta precisão, com todas as correções aplicáveis. Um datum vertical assim definido (a partir do NMM) é específico para o período considerado no cálculo do NMM e para o local do marégrafo, sendo afetado pela chamada topografia do NMM (TNMM), também denominada topografia da superfície do mar ou topografia dinâmica do oceano. Assim, a utilização de múltiplas estações maregráficas para referência de uma rede altimétrica, sem a necessária correção das respectivas TNMM, leva à introdução de distorções, como no caso do datum vertical australiano (Featherstone, 2002).

Até 1959, as altitudes da RAAP referiram-se provisoriamente ao Datum de Torres, no Rio Grande do Sul (RS), materializado pela altitude da RN 3L em relação ao NMM obtido de observações maregráficas no período de fevereiro de 1919 a fevereiro de 1920 (ALENCAR, 1968). Em 1959 foi concluído o terceiro ajustamento da RAAP, quando então suas altitudes passaram a referir-se ao Datum de Imbituba, em Santa Catarina (SC).

A primeira RN da RAAP em Imbituba, 4X, foi estabelecida em junho de 1946, como uma RN comum, já que não se antecipava, àquela época, que o marégrafo ali instalado posteriormente definiria o futuro datum vertical da RAAP. Em 1948, o serviço geodésico internacional (Inter American Geodetic Survey, IAGS) da então agência militar de mapeamento dos EUA (DMA, depois NIMA, hoje NGA) implantou o marégrafo no porto de Imbituba e estabeleceu uma rede local de nivelamento, para

controle e referência das observações de nível do mar. Em 1959, o IBGE estabeleceu e adotou o Datum de Imbituba, através da média dos NMMs anuais de 1949 a 1957, referida à RN 4X.

Quando iniciou a implantação da RAAP no estado do Amapá, o IBGE adotou o NMM no porto de Santana, entre 1957 e 1958, para estabelecer o Datum de Santana. Tal procedimento foi necessário em função da impossibilidade de travessia do baixo curso do Rio Amazonas com nivelamento de alta precisão.

2.4. Desenvolvimento espacial e cronológico da RAAP

O estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), sob coordenação inicial do então Conselho Nacional de Geografia (CNG), teve início em 1945, no extremo sul do Brasil (ALENCAR, 1990). Nos primeiros anos, foram realizadas conexões com as redes de nivelamento implantadas pelos então Serviço Geográfico do Exército (SGE, 1950) e Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo (IGG, 1962). Do Sul, a RAAP progrediu inicialmente em direção ao norte do país, através das regiões litorâneas de maior desenvolvimento econômico e demográfico, chegando também à recém estabelecida capital, Brasília (Figura 2). A partir da década de 1970, a implantação da RAAP foi direcionada ao interior do país, à substituição das redes de outras instituições e à reconstituição dos trechos destruídos (Figura 3).

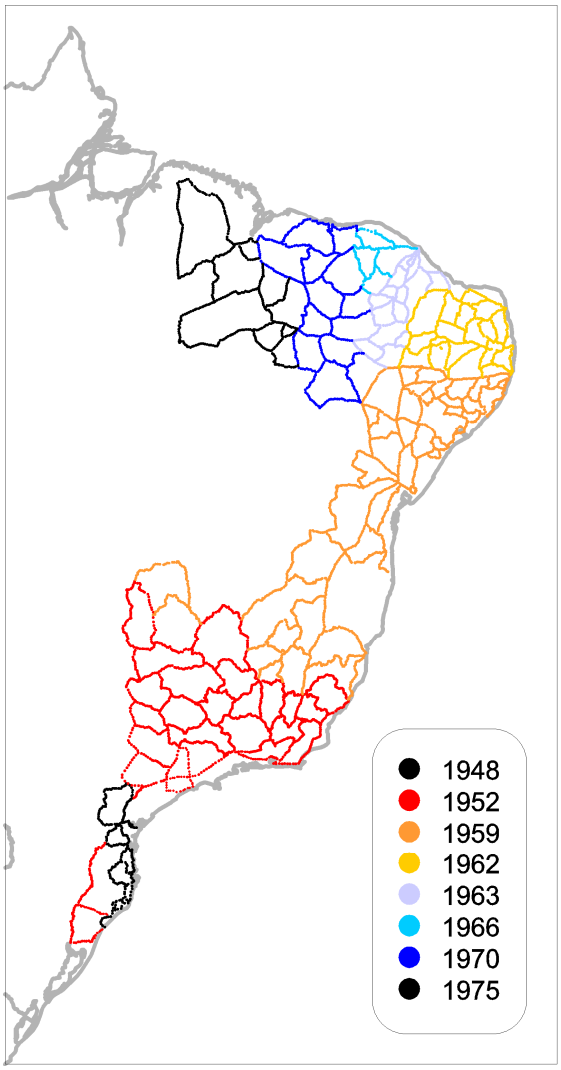

Figura 2 – Primeiros ajustamentos da RAAP referidos ao Datum de Torres (1948, 1952) e Imbituba (a partir de 1959). Adapt. de Alencar (1968)

Figura 3 – Rede Altimétrica do SGB com os *data* altimétricos brasileiros

3. Preparação do REALT-2018

3.1. Organização dos dados iniciais

Os dados brutos de nivelamento são compostos por informações de desnível entre RRNN sucessivas, oriundas de levantamentos de campo executados pelo IBGE a partir de 1945, através do método clássico de nivelamento geométrico de alta precisão

(duplos desníveis entre as estações niveladas: nivelamento/contra-nivelamento) com nível ótico ou digital, bem como as datas do levantamento e as distâncias niveladas, além de outras informações auxiliares (somatórios das leituras de ré e vante, código de unidade da federação etc). O Quadro 1 apresenta um exemplo atual com a formatação de entrada dos dados de nivelamento.

```
14            PORTO SANTANA                                C       504
      R               29717
      V11             29468
       1114        +    249    9          3122A            4326R      N   3
      R               29494
      V11             29742
       1114        -    248    9          3122A            4326R      C   3
      R               29099
      V11             27050
       1214        +   2049    2          4326R            3122D      N   3
      R               26971
      V11             29018
       1214        -   2047    2          4326R            3122D      C   3
      R               27329
      V11             28127
       1214        -    798    2          3122D            9303S      N   3
      R               28202
      V11             27404
       1214        +    798    2          3122D            9303S      C   3
      R               61095
      V11             52623
       1214        +   8472   14          9303S            9303T      N   3
      R               52804
      V11             61274
       1214        -   8470   14          9303S            9303T      C   3
      R               26967
      V11             24873
       1214        +   2094    9          9303T            3122G      N   3
      R               25050
      V11             27142
       1214        -   2092    9          9303T            3122G      C   3
      R               28739
      V11             27296
       1114        +   1443    9          3122G            3122F      N   3
      R               27346
      V11             28788
       1114        -   1442    9          3122G            3122F      C   3
```

Quadro 1 – Exemplo de arquivo de dados de nivelamento empregado no processo de ajustamento

O arquivo de desníveis preparado para o ajustamento de 2011 foi atualizado com as informações referentes aos nivelamentos posteriores e com algumas linhas eventualmente excluídas daquele cálculo. Foram inseridas observações correspondentes a 2142 RRNN no arquivo de desníveis do bloco principal do REALT-2018, referido ao Datum de Imbituba, conforme Figura 4.

Cabe ressaltar que o elevado índice de destruição das estações da RAAP leva à necessidade de estabelecimento de novas linhas ao longo de rodovias em que já haviam sido estabelecidas RRNN, sem, no entanto, existir a possibilidade de realizar conexões entre os nivelamentos novo e antigo. É essencial que tal característica seja levada em conta na preparação da rede para o ajustamento, já que, muitas vezes, os

circuitos formados seguem caminhos de difícil representação, introduzindo dificuldades significativas na etapa de análise dos respectivos erros de fechamento (seção 3.3).

Figura 4 – Desníveis inseridos no bloco principal do REALT-2018

Os dados de gravimetria utilizados nesse processo são oriundos de levantamentos gravimétricos realizados pelo IBGE e do Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG), a partir de levantamentos de instituições como ANP, Petrobrás, Furnas, Observatório Nacional, USP, e CPRM, entre outras.

As coordenadas planimétricas das RRNN podem ser oriundas de cartas topográficas nas escalas que o IBGE produz ou, modernamente, de levantamentos GNSS. Já as coordenadas das estações gravimétricas do IBGE foram obtidas apenas

por levantamentos GNSS. O Quadro 2 apresenta um exemplo com a formatação de entrada dos dados de coordenadas das RRNN da RAAP.

1623Z	001325000512337000
1624P	001312000512151000
1624R	001402000511957000
1624T	001412000511812000
1625B	-000230000511026000
1626C	-000317000510659000
1626L	-000316200511429800
1626P	-000636700511705600
1626T	-000701000511703100
1628A	-000245000513417000
1628G	000145200513806200
1628N	000754700513650700
1628T	000936000513128000
1628U	001045000513019000
1628Z	001317000512652000
1629B	001409200511605400
1629C	001410700511511300
1629D	001326800511343200
1629H	001339000510927000
1629J	001411000510813000
1629L	001245000510724000
1629N	001038000510728000
1629R	000745000510806000
1629S	000631000510734000
1630A	000737000510326000
1630B	000803000510309000
1630F	000321000510316000
1630H	000244000510334000

Quadro 2 – Parte do arquivo de coordenadas de RRNN empregado no processo de ajustamento

O Banco de Dados Geodésicos (BDG) contém informações de descrição dos marcos, localização, situação de conservação, foto, coordenadas, datas de levantamento, cálculo e visita, entre outras. Estas informações são essenciais para adequada utilização por parte dos usuários do SGB, e foram objeto de revisão e análise em paralelo ao ajustamento da RAAP, a fim de garantir a integridade das informações disponíveis no BDG.

3.2. Ferramentas computacionais utilizadas

3.2.1. Programa IDNOS

Realiza a montagem automática da rede de nivelamento, identificando os pontos nodais, detectando as verificações de abalo temporal e listando as linhas internodais que compõem a rede. O IDNOS foi essencial para acelerar a detecção e correção de algumas inconsistências, por meio da análise temporal dos trechos repetidos nas chamadas verificações de abalo. Para aplicação no REALT-2018, este programa teve

sua capacidade ampliada para atender à atual rede de nivelamento, pois a versão original foi elaborada considerando uma parte menor da rede (Luz, 2008, p.126).

3.2.2. Programa Monta_INTCOBS

Realiza a reformatação dos arquivos de desnível e de coordenadas da Rede Altimétrica, descritos anteriormente, em formato adequado para processamento no software GHOST, incluindo a ponderação das observações para o ajustamento. Os pesos têm como base a precisão nominal dos desníveis em função do comprimento da seção, isto é, $4mm.K^{1/2}$. Os arquivos reformatados são utilizados, inicialmente, para o ajustamento preliminar da rede, com o objetivo de obter altitudes consistentes, necessárias à interpolação dos valores de gravidade.

3.2.3. Programas GEOGRID e PREDGRAV

O programa GEOGRID faz parte do conjunto GRAVSOFT de modelagem do geoide (Forsberg, Tscherning, 2008), e implementa cálculos para modelagem do campo da gravidade pela técnica da colocação por mínimos quadrados. Foi utilizado no REALT-2018 para interpolação de valores de gravidade nas RRNN que não dispunham dessa informação no início do reajustamento.

O programa PREDGRAV também realiza a interpolação de gravidade via colocação por mínimos quadrados. Foi disponibilizado aos participantes do Projeto SIRGAS (SIRGAS, 2005), mas sua utilização no REALT-2018 foi inviabilizada pelo tempo excessivamente longo consumido para o cálculo de cada ponto, incompatível com a necessidade dos inúmeros testes descritos na seção 3.8.

3.2.4. Programa INTCOBS_geopotencial

Calcula as diferenças de número geopotencial das seções, a partir dos arquivos de desníveis e gravidade resultantes dos programas abordados nas seções anteriores. Este programa ainda analisa as coordenadas planimétricas (por meio da comparação entre as distâncias nivelada e calculada), desníveis, altitudes e gravidade (via comparação entre diferenças de anomalia Bouguer e de desníveis). Além disso, gera um arquivo com os valores da gravidade normal média na vertical utilizados na etapa

final para conversão dos números geopotenciais ajustados em altitudes normais para cada estação existente no arquivo de entrada.

O sistema GHOST, utilizado para o ajustamento das observações, como descrito no próximo item, não está preparado para tratar números geopotenciais. Em princípio, isso não constitui dificuldade significativa, pois as diferenças de geopotencial poderiam ser submetidas ao GHOST como se fossem desníveis. No entanto, o desempenho das rotinas de identificação de possíveis “outliers” poderia ser afetado, em função da diferença de escala entre número geopotencial e altitude. A fim de evitar tal problema, o programa INTCOBS_geopotencial aplica um fator de escala fixo às diferenças de geopotencial gravadas no arquivo de entrada para o GHOST. Posteriormente, outro programa realiza a conversão contrária, reconstituindo os números geopotenciais ajustados, a partir dos valores extraídos do arquivo de resultados consolidados do GHOST, e calculando também as respectivas altitudes normais.

3.2.5. GHOST

GHOST (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data*) é um conjunto de programas computacionais desenvolvidos pela Divisão de Levantamentos Geodésicos do governo canadense (GSD, *Geodetic Survey Division*), com o objetivo de realizar o ajustamento, por mínimos quadrados, das observações de grandes redes geodésicas tridimensionais (Beattie, 1987). Este é o caso do bloco principal do REALT-2018, constituído por mais de 70400 desníveis e quase 66900 RRNN.

O sistema GHOST possibilita o ajustamento de redes geodésicas de acordo com duas estratégias matemáticas diferentes:

- técnica padrão: para redes geodésicas de porte médio e menores, com até, aproximadamente, 1500 observações, em que não é necessária a decomposição em blocos, sendo possível a solução de um único sistema de equações. Este seria o caso, por exemplo, do ajustamento das linhas internodais da RAAP;

- divisão por blocos de Helmert: para grandes redes, como, por exemplo, o ajustamento com todas as observações da RAAP, isto é, os desníveis das seções entre RRNN

individuais. Suas bases conceituais foram desenvolvidas por Helmert no final do século XIX. No entanto, sua aplicação prática tornou-se viável somente após a expansão e consolidação do uso científico de computadores, na década de 1970 (Beattie, 1987).

Com a finalidade de evitar a sobrecarga computacional decorrente do tratamento de sistemas matriciais superdimensionados, a técnica “Helmert blocking” divide o ajustamento de uma grande rede geodésica em vários blocos menores. Esta divisão em blocos pode seguir variados critérios, sendo a divisão por regiões e por tipo de levantamento geodésico os critérios mais comuns.

O ajustamento simultâneo da RAAP com todos os desníveis resulta na produção de um conjunto homogêneo de altitudes, e respectivos desvios padrão, para toda a rede.

3.2.6. Programa SIGMA_DESN_GHOST

Este programa extrai os números geopotenciais ajustados do arquivo de resultados consolidados do GHOST, reconstituindo sua escala real, em virtude da aplicação do fator de escala fixo mencionado no item 3.2.4.

Além disso, este programa também extrai os resíduos aplicados às diferenças de geopotencial no processo de ajustamento, bem como os respectivos desvios-padrão, a fim de estimar as precisões relativas de cada seção de nivelamento.

3.3. Identificação preliminar das linhas internodais e análise temporal das estações

Em toda nova linha implantada pelo IBGE, deve ser realizada uma verificação de abalo temporal em RRNN já existentes, para confirmar a permanência das mesmas em suas posições originais e, assim, possam servir de conexão de partida e chegada à Rede Altimétrica.

O procedimento consiste no cálculo da diferença entre os desníveis observados nas diferentes épocas, para cada seção renivelada. Uma vez que este “erro de fechamento temporal” resulte em um valor acima da tolerância estabelecida (IBGE, 2017), é realizada a análise das seções anteriores e posteriores, a fim de identificar a RN abalada, por meio do chamado “código de nova posição”.

Nesta etapa, o programa IDNOS identificou 991 seções para verificação temporal (Figura 5). No entanto, para uma análise detalhada e completa de cada caso, foram realizadas um total de 2302 análises.

Figura 5 – Trechos da RAAP submetidos à análise temporal e atribuição de códigos de nova posição

3.4. Fechamento e análise dos circuitos através das linhas internodais

O cálculo do erro de fechamento dos circuitos faz parte do controle de qualidade da RAAP, conforme especificações vigentes (IBGE, 2017). Para o REALT-2018, o IBGE optou por proceder a uma completa revisão de todos os circuitos da rede. Após a

análise da variação dos perímetros, da precisão do nivelamento realizado pelo IBGE desde o início dos levantamentos e visando um maior controle da rede, optou-se pelo valor de 5 mm√km para a tolerância. Foram detectados 1482 circuitos, sendo que aproximadamente 20% destes apresentaram fechamento acima da tolerância. As distribuições dos valores de perímetro e fechamento dos circuitos são representadas nas Figuras 6 e 7.

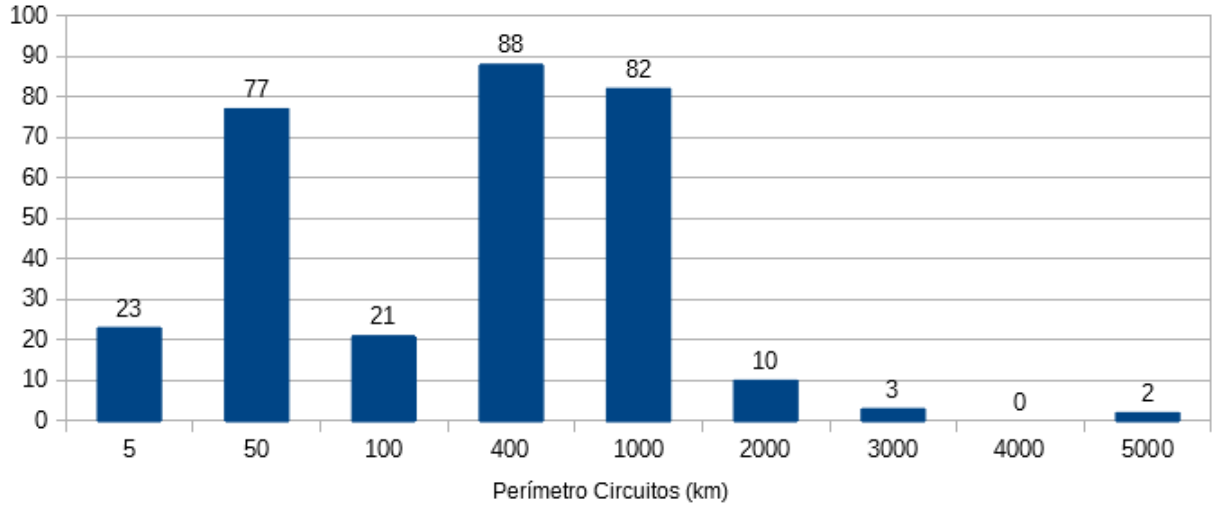

Figura 6 – Distribuição dos valores de perímetro dos circuitos da RAAP com fechamento acima da tolerância

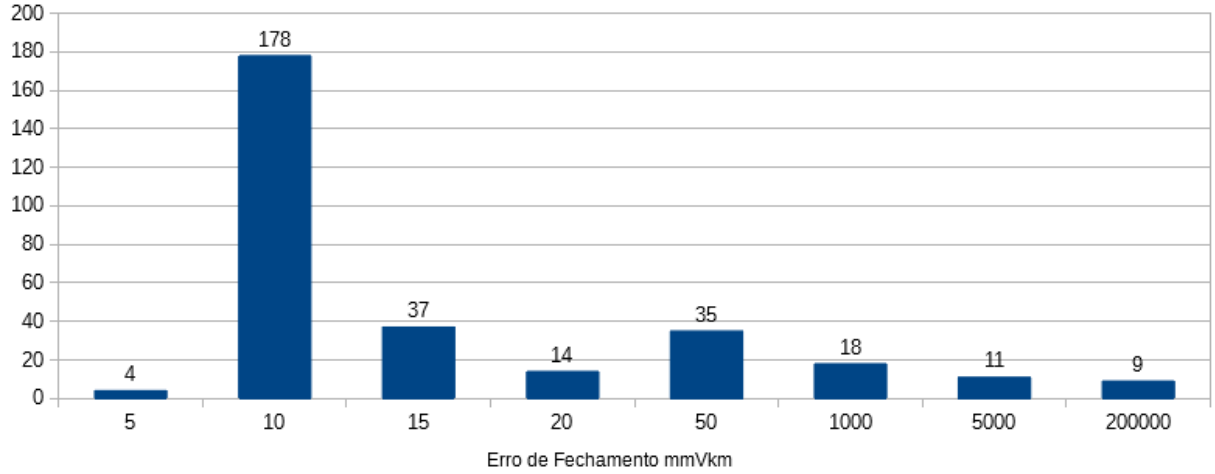

Figura 7 – Distribuição dos valores de fechamento acima da tolerância

Os circuitos que apresentaram fechamento superior a essa tolerância, foram analisados de forma mais detalhada, a fim de identificar trechos com possíveis inconsistências. Nos casos em que a suspeita de inconsistência não pôde ser afastada,

os respectivos desníveis foram retirados do ajustamento principal da RAAP, evitando possível contaminação dos resultados. Aproximadamente 5468 RRNN, ou 7,5% da rede, foram desconsideradas do ajustamento principal e calculadas de forma individual (Figura 8). Deste total, pouco mais de 2400 RRNN referem-se ao grande circuito amazônico (Rondônia, sudeste do Amazonas, oeste do Pará) e aos longos ramais vinculados ao mesmo (Amazonas-Roraima e Rondônia-Acre).

Figura 8 – RRNN rejeitadas no ajustamento principal

3.5. Ajustamento da rede internodal

Após a remoção das observações rejeitadas na análise dos fechamentos dos circuitos, procedeu-se ao ajustamento da respectiva rede internodal. A finalidade deste procedimento é detectar e facilitar a depuração das inconsistências eventualmente não identificadas na etapa anterior, cuja detecção no ajustamento da rede total (seções individuais) oferece dificuldade significativamente maior. Todas as linhas internodais que apresentaram precisão relativa (resíduos normalizados pelo comprimento das linhas) superior a 4mm√km foram analisadas e corrigidas ou removidas. A cada inconsistência tratada, foi reprocessado o ajustamento até que a rede internodal apresentasse resultados consistentes. A Figura 9 apresenta as 4935 linhas internodais resultantes desta etapa.

Figura 9 – Pontos nodais e respectivas linhas internodais

3.6. Ajustamentos preliminares da RAAP, análise e correção das novas inconsistências

Após formatação dos arquivos de desníveis, o sistema GHOST apresentou problemas de excesso de observações com a divisão de blocos utilizada no ajustamento em 2011. Para solucionar tal empecilho, foi realizado um redimensionamento na divisão dos blocos do GHOST. A Figura 10 apresenta a nova divisão de blocos.

A fase dos ajustamentos preliminares consistiu na divisão da rede com base nos limites dos 4 blocos do GHOST (Figura 10) ilustra as 4 sub-redes em que a Rede Altimétrica principal foi dividida para análise. Após o processamento de cada bloco as precisões relativas das seções eram calculadas e tratadas da mesma forma que descrita durante o ajustamento da rede internodal.

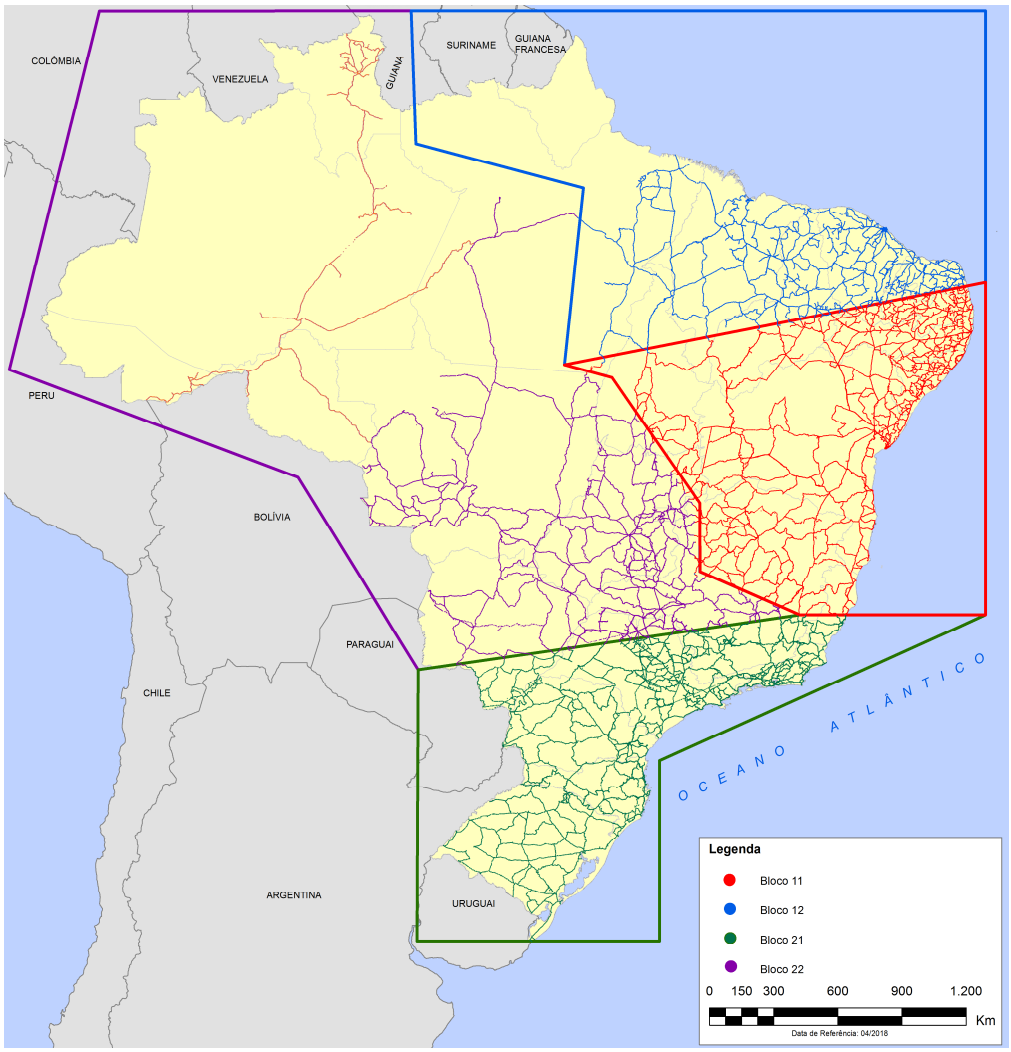

Figura 10 – Subdivisão da Rede Altimétrica para análise individual por bloco

Tão logo a análise dos 4 blocos foi concluída, toda a Rede foi submetida ao ajustamento simultâneo no GHOST por blocos de Helmert. Neste, ainda restaram algumas observações com resíduos altos, decorrentes de trechos antes conectados a linhas agora rejeitadas. Todos os trechos nesta situação passaram por uma crítica adicional, resultando na rede depurada e pronta para ser avaliada nas etapas subsequentes.

3.7. Análise e correção de coordenadas planimétricas das estações

O arquivo de coordenadas das estações foi montado a partir do Banco de Dados Geodésicos (BDG).

Antes de iniciar o processo de interpolação do valor de gravidade das RRNN não gravimetradas, se fez necessária a análise e correção nos valores de coordenadas destas. Para tal, foi utilizado o programa INTCOBS_GEOPOTENCIAL que indicou a priori 107 seções com diferença entre distância nivelada e calculada a partir das coordenadas planimétricas até 10 km (Figura 11).

Figura 11 – Seções com discrepância acima de 10 km entre distâncias observada no nivelamento e calculada a partir das coordenadas planimétricas

Após algumas simulações com os valores das diferenças das distâncias, identificou-se que apenas aquelas que se apresentaram superiores a 10 km influenciariam no cálculo final das altitudes. Logo, foram corrigidas apenas as diferenças superiores a 10km, sendo as demais indicadas em relatórios internos para análise futura.

Estas discrepâncias ocorrem, em sua maioria, devido à diferença na fonte das coordenadas de RRNN sucessivas, pois em uma mesma linha de nivelamento podem existir RRNN com coordenadas extraídas de cartas topográficas em escalas padrão IBGE e outras com coordenadas oriundas de levantamentos GNSS.

3.8. Interpolação dos dados de Gravidade

Durante o processo de interpolação dos valores de gravidade das RRNN não gravimetradas pelo IBGE, foram utilizados 106 mil pontos de gravimetria como base para a interpolação, tanto oriundos de levantamentos realizados pelo IBGE, como cedidos por outras Instituições. A distribuição espacial destes é ilustrada na Figura 12. Atualmente, o IBGE conta com pouco mais de 15 mil RRNN com conexão de gravimetria, representadas na Figura 13.

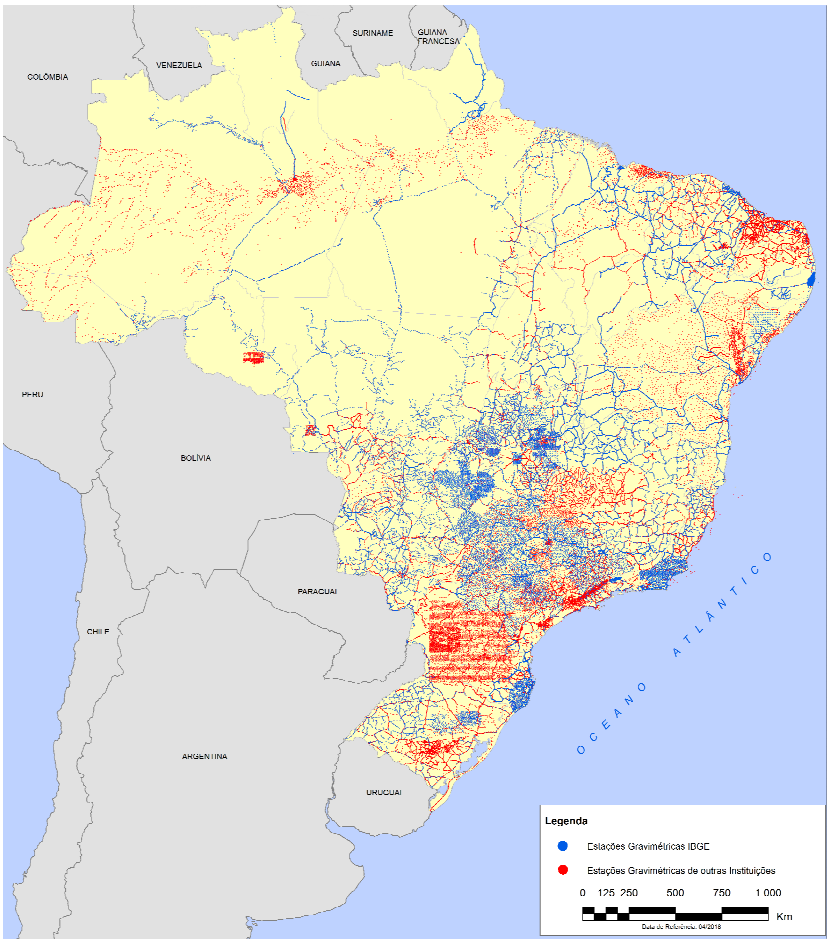

Figura 12 – Distribuição espacial das estações com gravimetria empregadas na interpolação

Figura 13 – Distribuição espacial das Estações Gravimétricas (EEGG) do IBGE com conexão com RRNN

Além dos pontos gravimétricos do IBGE e de outras instituições, foram considerados como base no processo de interpolação alguns modelos:

- EIGEN_6S4(V2), no sistema de maré Mean tide e com grau máximo de 250;
- EIGEN_6C4, no sistema de maré Mean tide e com grau máximo de 2190;
- GOCO05c, no sistema de maré Mean tide e com grau máximo de 720;

Para determinar o modelo ou conjunto de pontos mais adequado como base para a interpolação de gravidade, foram consideradas duas análises. A primeira foi a comparação direta entre os valores de gravidade observados em aproximadamente 13912 pontos de conexão gravimétrica em Referências de Nível com os valores de gravidade destas mesmas RRNN após a interpolação empregando os dados e modelos citados. A Figura 14 ilustra os pontos de conexão utilizados nesta análise.

No histograma apresentado na Figura 15, observa-se que o conjunto mais adequado como base para a interpolação do valor de gravidade das RRNN carentes deste dado é o conjunto de pontos do IBGE com dados de outras instituições. Estes são necessários, pois, como apresentado na Figura 12, a rede gravimétrica do IBGE ainda não atende de modo satisfatório a todo o território brasileiro.

Figura 14 – Distribuição espacial dos pontos de conexão EG em RN empregados na análise da interpolação de gravidade

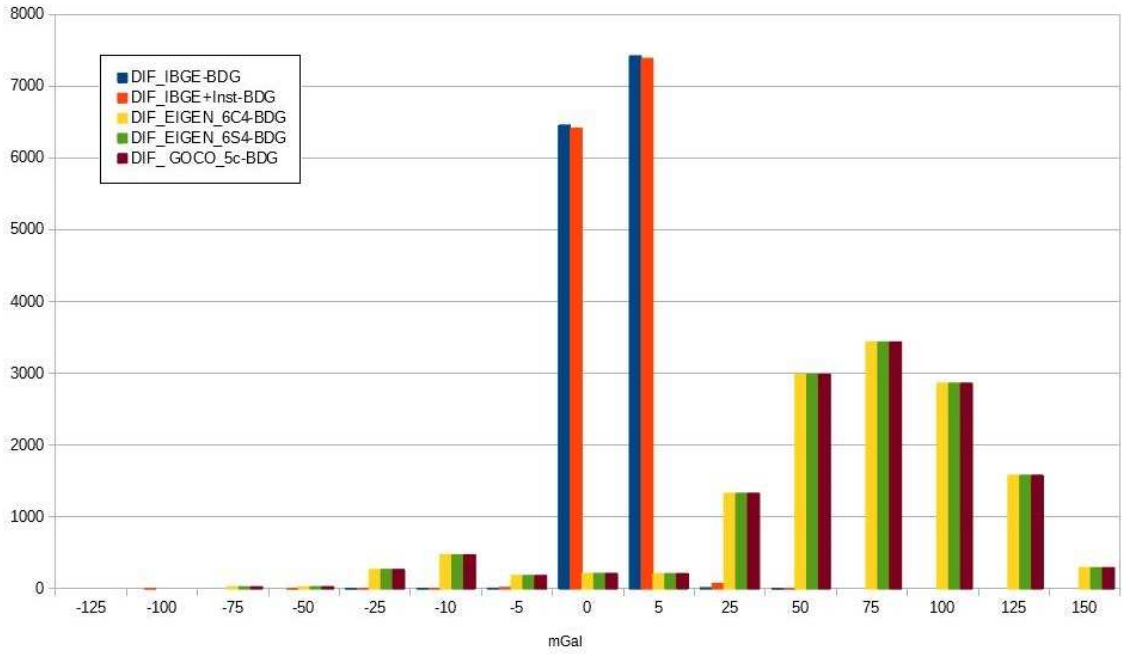

Figura 15 – Comparação entre gravidade observada e os respectivos valores interpolados a partir de diferentes fontes

A segunda metodologia empregada na análise dos dados de base para interpolação de gravidade consistiu na escolha aleatória de 1210 seções de nivelamento em que cada RN possui conexão gravimétrica levantada pelo IBGE (Figura 16).

Figura 16 – Distribuição espacial das seções de nivelamento empregadas na análise dos dados gravimétricos de diferentes origens.

Os dados empregados nesta análise foram os desníveis das seções, o valor de gravidade de cada referência de nível levantado pelo IBGE, bem como os valores de gravidade de cada RN obtidos após a interpolação. A partir da equação 2, foram calculadas as diferenças de número geopotencial das seções considerando os diferentes valores de gravidade, sendo tomada como referência a diferença de número geopotencial obtida com os valores de gravidade mensurados. O histograma ilustrando as discrepâncias entre as diferenças de número geopotencial considerando as diferentes fontes de informação gravimétrica é apresentado na Figura 17.

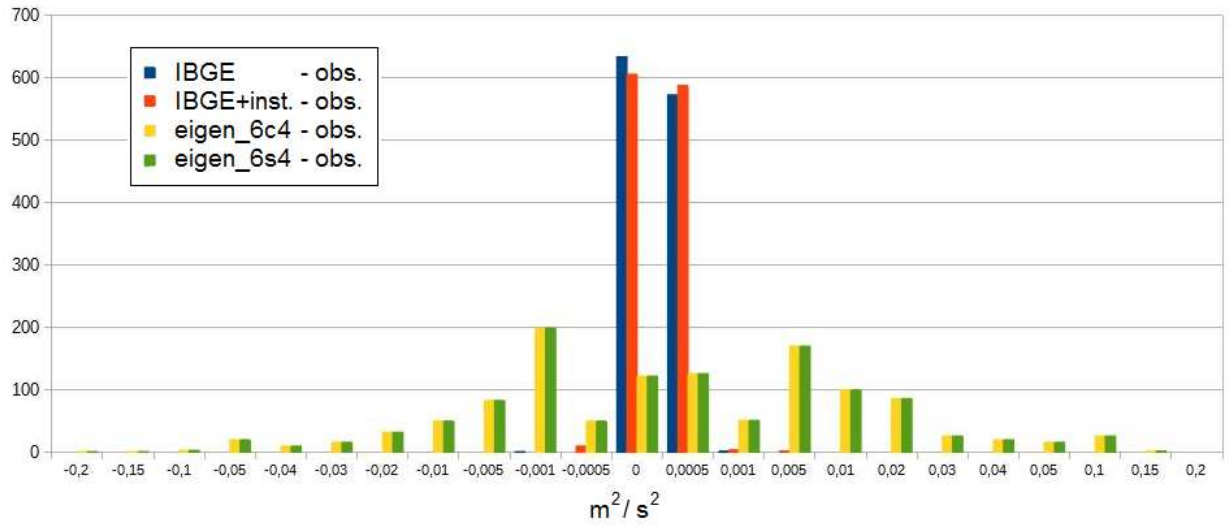

Figura 17 – Histograma com as discrepâncias entre as diferenças de geopotencial das seções analisadas.

Com base neste histograma, identifica-se que os valores das diferenças de número geopotencial calculados a partir da gravidade interpolada com os modelos do geopotencial apresentam significativa variação quando comparados com os valores calculados com a gravidade conhecida, confirmando a escolha do conjunto de dados do IBGE e de outras instituições como a opção mais adequada. Cabe ressaltar que, em regiões onde o conjunto IBGE+instituições seja insuficiente, deverá ser analisada a conveniência do emprego dos modelos mencionados.

3.9. Cálculo dos números geopotenciais referentes aos *Data* de Imbituba e Santana

Os valores de número geopotencial para as RRNN de partida da Rede Altimétrica, 4X (Datum de Imbituba) e 9329T (Datum de Santana), foram calculados com a equação 5, a partir dos respectivos valores de altitude existentes no BDG, considerando que, conceitualmente, ao nível do mar, as diferentes altitudes físicas são equivalentes:

4X = 84,565 m^2 / s^2

9329T = 61,401 m^2 / s^2

3.10. Cálculo das diferenças de número geopotencial

O arquivo de desníveis já formatados para o GHOST, e depurados nas etapas descritas anteriormente, e o arquivo de valores de gravidade interpolados pelo

programa GEOGRID, constituem os dados de entrada para o programa INTCOBS_geopotencial, que calcula as diferenças de geopotencial segundo a equação 2, gerando novo arquivo em formato GHOST. Também é gerado um arquivo com os valores da gravidade normal média na vertical para cada RN, para conversão dos números geopotenciais resultantes do ajustamento em altitudes normais (equação 5).

4. Cálculo dos Números Geopotenciais e Altitudes Normais

4.1. Ajustamento das diferenças de número geopotencial do bloco principal

Submetido ao GHOST, o arquivo com as diferenças de geopotencial selecionadas para compor o bloco principal do REALT-2018 resulta em três conjuntos de resultados: a lista de observações com os respectivos resíduos e indicadores de qualidade; a lista de parâmetros ajustados, igualmente com seus desvios-padrão; e os indicadores de qualidade globais. A Tabela 1 apresenta um resumo desse ajustamento.

Além da conversão dos números geopotenciais ajustados em altitudes normais, o programa SIGMA_DESN_GHOST também procede à extração e preparação dos resultados do ajustamento para apresentação sob forma de cartogramas, como descrito a seguir.

Tabela 1 – Indicadores de qualidade do ajustamento do bloco principal do REALT-2018

	total
nº altitudes (RRNN)	66882
nº desníveis (seções)	70426
nº resíduos (seções formando circuitos)	62782
variância da unidade de peso a posteriori	1,186

A qualidade dos resultados individuais pode ser avaliada mediante a padronização dos resíduos em função das distâncias. Na Figura 18, observa-se a distribuição dos resíduos padronizados (erros relativos)) do bloco principal do REALT-2018, constatando-se que:

- 92,7% das seções sofreram correções na faixa de –1mm(K)$^{1/2}$ a +1mm(K)$^{1/2}$,
- 98,0% entre –2mm(K)$^{1/2}$ e +2mm(K)$^{1/2}$,
- 99,1% de –3mm(K)$^{1/2}$ e +3mm(K)$^{1/2}$, e
- 99,5% entre –4mm(K)$^{1/2}$ e +4mm(K)$^{1/2}$.

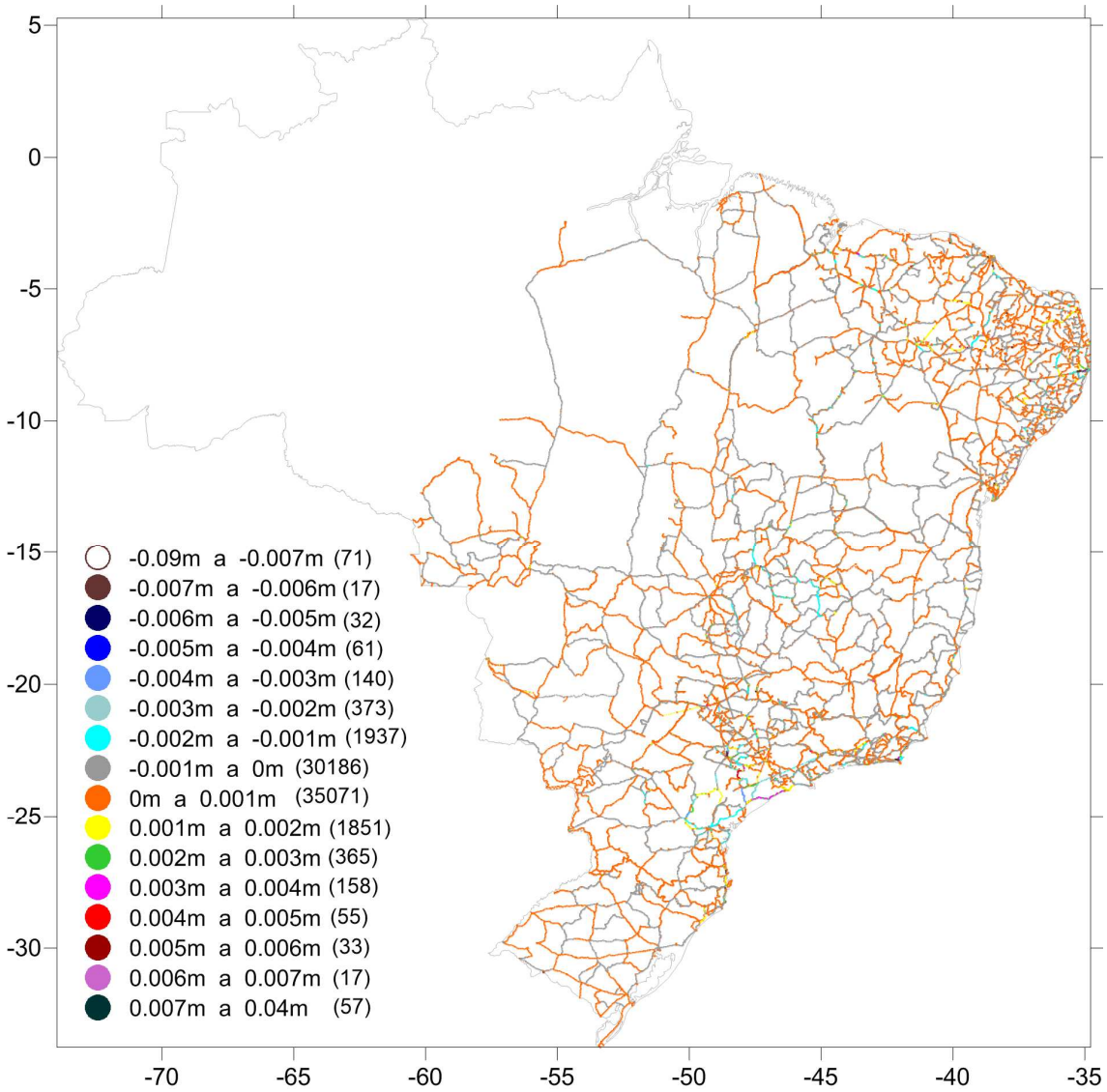

Figura 18 – Erros relativos dos desníveis após ajustamento do bloco principal do REALT-2018

Em termos absolutos, a avaliação da qualidade dos resultados do REALT-2018 pode ser feita com base nos desvios-padrão dos números geopotenciais ajustados, apresentados na Figura 19. Observa-se que 55445 desses valores, ou 87,5%, situam-se no intervalo 6cm~10cm. No entanto, o aspecto mais relevante é a consistência na conformação das isolinhas de precisão nessa figura, refletindo a homogeneidade da propagação das incertezas pela rede a partir do Datum de Imbituba.

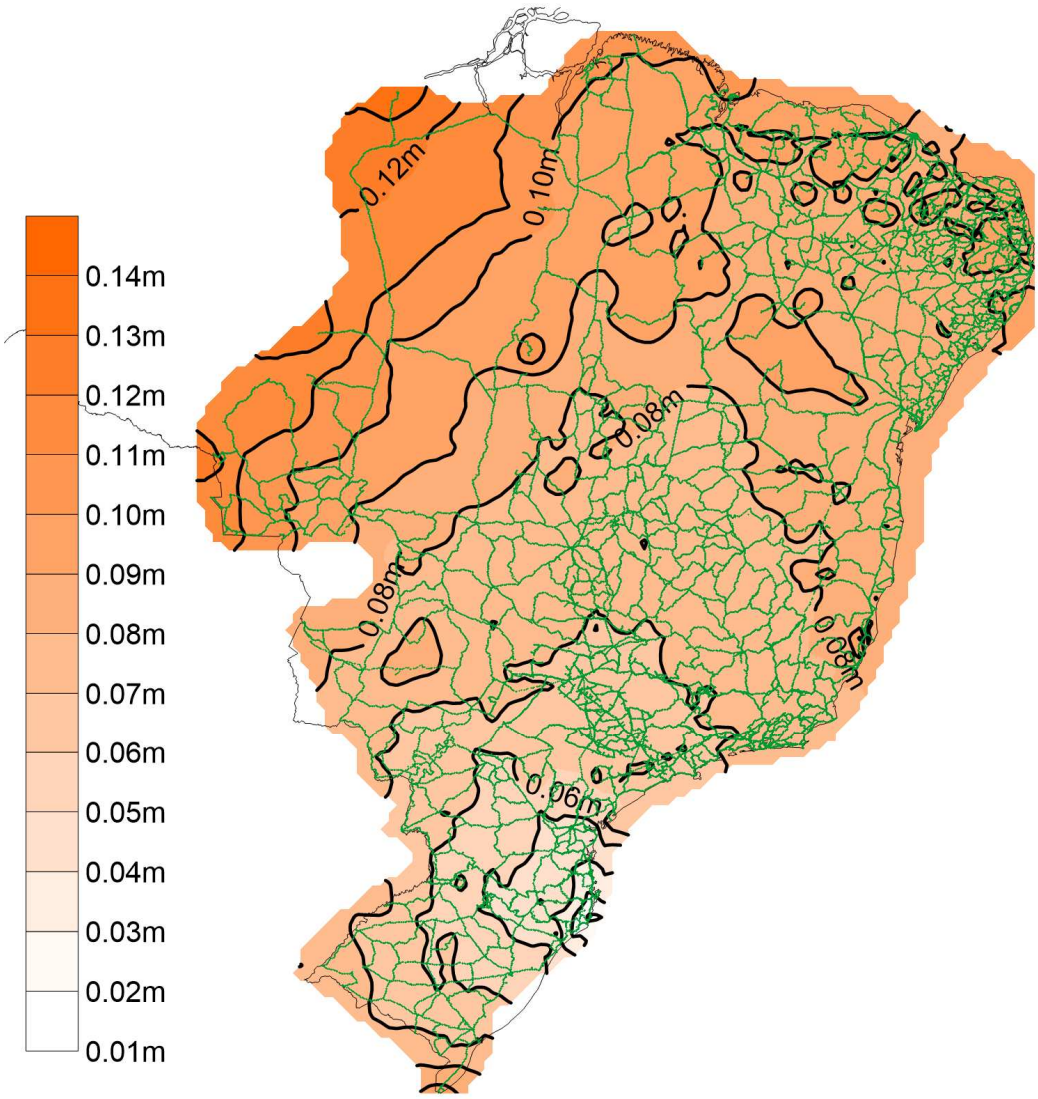

Figura 19 – Desvios-padrão dos números geopotenciais ajustados

A avaliação do impacto das novas altitudes sobre os usuários do SGB constitui parte essencial no processo de qualificação do REALT-2018. Na Figura 20, observa-se que as altitudes normais de aproximadamente 50 mil RRNN (76%) diferem de +20cm a +30cm das altitudes ortométricas-normais vigentes no BDG até julho de 2018, em grande parte das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste.

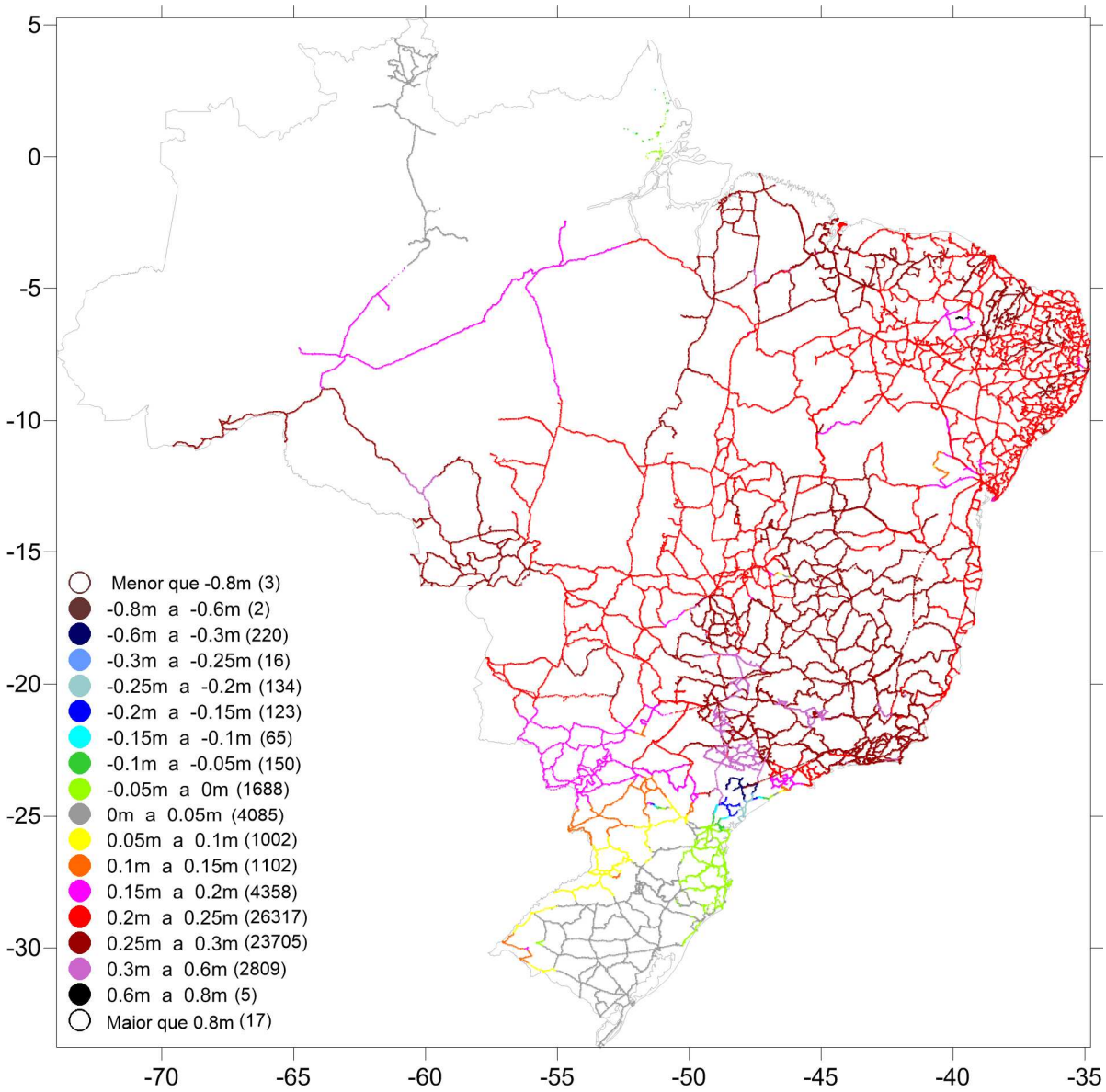

Figura 20 – Diferenças entre as altitudes normais do REALT-2018 e as altitudes ortométricas-normais vigentes no BDG até julho/2018

Já na região Sul, a variação em uma faixa diferente de valores, entre -5cm e +20cm, deve-se à proximidade em relação ao Datum de Imbituba, como se pode observar na Figura 21.

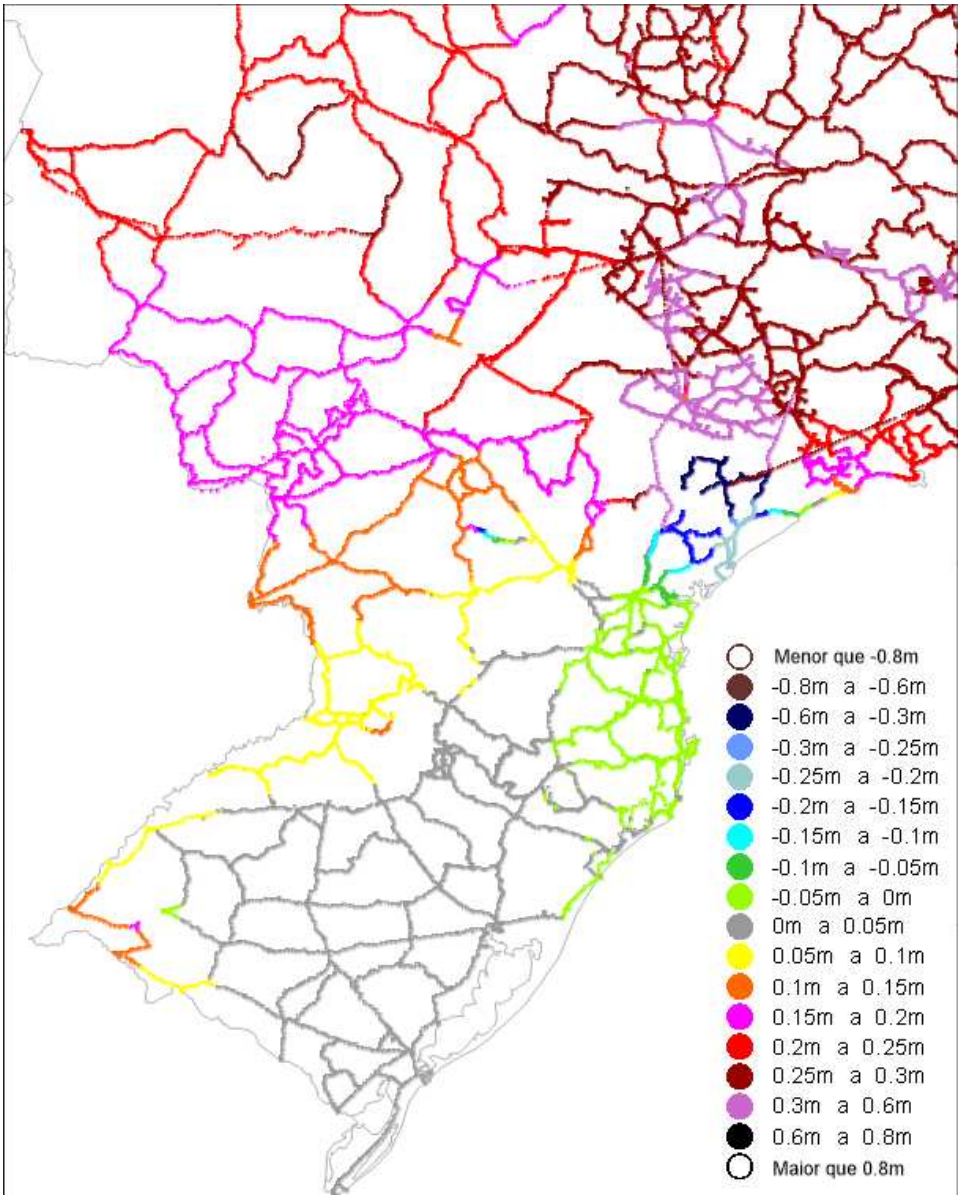

Figura 21 – Diferenças, no entorno do Datum de Imbituba, entre as altitudes normais do REALT-2018 e as ortométricas-normais vigentes no BDG até julho/2018

A Figura 21 permite constatar a existência de uma descontinuidade na região de Curitiba, onde os pontos em verde dão lugar a pontos em violeta. Trata-se de inconsistência na conexão entre uma linha da década de 1980 e outra dos anos 1940, detectada na etapa de fechamento de circuitos. A eliminação da inconsistência levou ao surgimento da descontinuidade nas diferenças entre as altitudes.

4.2. Ajustamento do bloco principal com a Correção Normal-Ortométrica

Para uma análise mais direta dos impactos da integração de informações gravimétricas aos desníveis da RAAP, foi realizado um ajustamento similar ao relatado no item anterior. Foram mantidos os mesmos dados de nivelamento, mas a substituição dos desníveis pelas diferenças de geopotencial foi eliminada. Em seu lugar, foi aplicado o mesmo procedimento dos ajustamentos anteriores da RAAP: a correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais, através da equação denominada correção normal ortométrica (Luz, 2008, p.52):

$$\delta H^{Nort} \approx -2\alpha_1 H_m \Delta\varphi \operatorname{sen}(2\varphi_m)\left[1+(\alpha_1 - 2\alpha_2/\alpha_1)\cos(2\varphi_m)\right] \tag{12}$$

sendo H_m a altitude média da seção, φ_m a latitude média da seção, e α_1 e α_2 parâmetros da fórmula de Helmert para a gravidade normal, sendo para o sistema geodésico de referência GRS80 (Relatório Ajustamento 2011):

α_1 = 0,0053023655

α_2 = -0,0000059

A comparação das altitudes normais do REALT-2018 com as altitudes ortométricas-normais obtidas com os mesmos dados e geometria de rede permite isolar os efeitos da inserção da gravidade real. Conclui-se que 94% das RRNN apresentam diferenças entre -0,5mm e +1,5mm (Figura 22). Assim, é possível afirmar que os refinamentos decorrentes da depuração de inconsistências e melhoria da geometria da rede considerada no REALT-2018 são responsáveis por grande parte das diferenças entre as novas altitudes normais e as altitudes vigentes no BDG até julho de 2018.

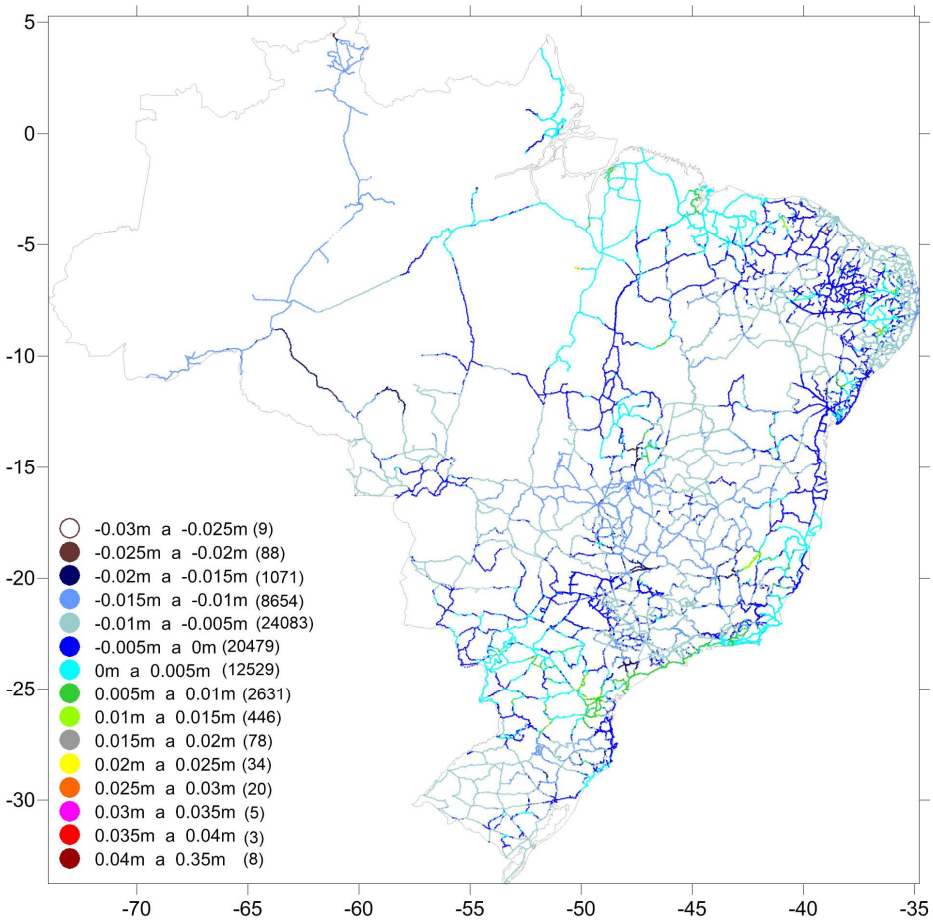

Figura 22 – Diferenças entre as altitudes normais do bloco principal do REALT-2018 e as altitudes ortométricas-normais calculadas com a mesma rede

4.3. Ajustamento das seções e/ou linhas desconsideradas após fechamento dos Circuitos

Durante o processo de depuração da rede altimétrica, foi necessário retirar alguns trechos que apresentavam inconsistências e que contribuiriam de forma negativa no processo de ajustamento final. Alguns destes trechos já haviam sido retirados nos ajustamentos anteriores e outros foram identificados nos processos de análise da rede já descritos neste relatório.

Devido à importância espacial de alguns trechos retirados durante a análise da Rede, aliada ao fato que tais inconsistências no ajustamento individual do trecho não impactariam o usuário, optou-se por realizar o processamento individual destes trechos. Dessa forma, foram evitados eventuais impactos negativos da indisponibilidade dos mesmos no BDG.

Este processamento individual consistiu em considerar os valores ajustados da rede principal como pontos fixos dos trechos, o que acarreta a conexão destes na rede altimétrica, no entanto a inconsistência encontrada não se propaga para o restante da rede.

Como exemplo prático de tal situação, tem-se o grande circuito amazônico, com perímetro de mais de 4000 km e fechamento acima da tolerância, tendo sido rejeitado do ajustamento do bloco principal do REALT-2018. No entanto, a retirada deste trecho acarretaria um vazio considerável na rede altimétrica da região, logo tanto o grande circuito amazônico como os ramais a ele conectados (Humaitá-Venezuela; PortoVelho-Brasiléia) foram ajustados/calculados individualmente considerando 2 RRNN pertencentes a rede principal já ajustada como pontos de partida e chegada da linha. A Figura 23 ilustra a situação explicitada.

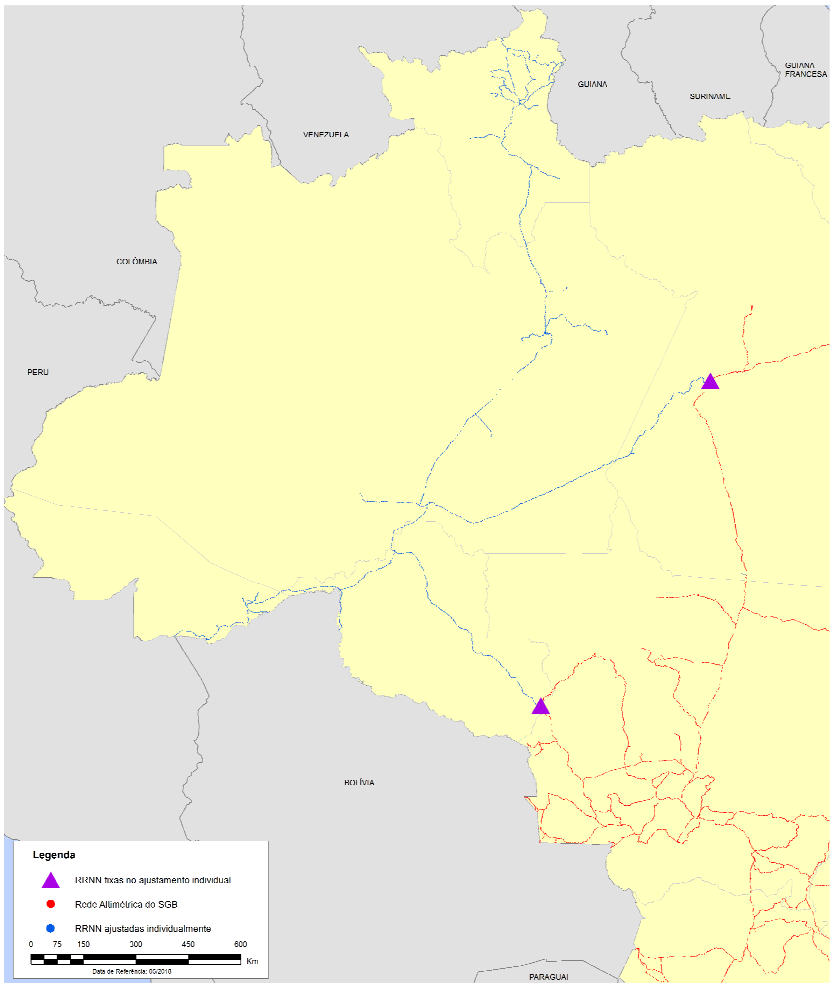

Figura 23 – Ajustamento individual do macro circuito amazônico

4.4. Ajustamento da Rede Altimétrica do Amapá

Desde 2014, o IBGE vem desenvolvendo a revitalização do SGB, principalmente da rede altimétrica, do Estado do Amapá, em parceria com o governo estadual. A construção e nivelamento da nova rede ocorreu em duas etapas. A primeira consistiu de linhas pelas principais vias do estado, ocasionando que grande parte da nova rede altimétrica do Amapá foi desenvolvida em forma de ramais. Na segunda etapa, foram construídos e nivelados circuitos na região metropolitana, proporcionando assim um controle maior da rede nesta região. A figura 24 ilustra a Rede Altimétrica do Amapá atual.

Figura 24: Rede Altimétrica do Estado do Amapá

Durante o desenvolvimento do projeto, também foram realizadas observações de gravidade em mais de 85% da rede de nivelamento, o que contribuiu significativamente no cálculo das diferenças do número geopotencial e seu posterior ajuste, pois apenas uma pequena parte da rede necessitou de interpolação do valor de gravidade.

O processo de ajustamento da rede do Amapá ocorreu de modo similar ao da rede vinculada ao datum de Imbituba. Inicialmente foram realizados todos os fechamentos de seção, análise temporal das RRNN remanescentes da antiga rede e fechamento de circuitos.

Foi realizado o cálculo do número geopotencial da RN 9329T (Datum de Santana) com base na metodologia apresentada na seção 3.9. Com os programas internos: monta_INTCOBS e INTCOBS_geopotencial foi realizada a reformatação dos arquivos brutos de desnível e distância para o formato de entrada do software de ajustamento GHOST, bem como os cálculos das diferenças do número geopotencial e da gravidade normal média das referências de nível e respectivos pesos a priori. A rede altimétrica do Amapá também foi ajustada considerando apenas a correção normal ortométrica (equação 12) nas observações.

Durante a implantação da rede, foi realizada a verificação da realidade física das estações implantadas em 1980/1981. Foram encontradas em torno de 85 referências de nível, devidamente incorporadas a nova rede. A Figura 25 ilustra as diferenças entre as novas altitudes normais e as vigentes no BDG até julho/2018.

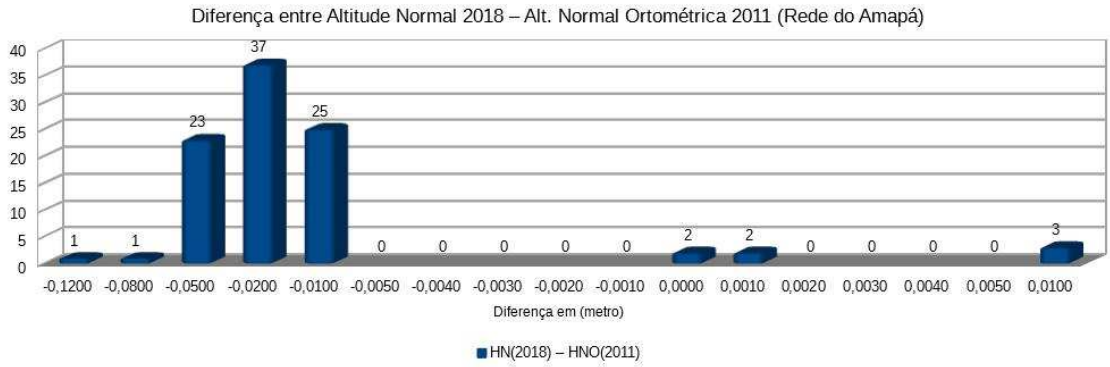

Figura 25: Diferenças entre altitudes normais (2018) e ortométricas normais (2011) das RRNN do Estado do Amapá

4.5. Análise, crítica e liberação das informações descritivas

Um processo laborioso, mas de suma importância, foi a análise dos descritivos e coordenadas das referências de nível que ainda estavam pendentes na plataforma computacional interna da Coordenação de Geodésia denominada SADGEO. As informações do Banco de Dados Geodésicos (BDG) disponibilizadas para o usuário através dos Relatórios de Estações Geodésicas (REG), são carregadas no BDG após a crítica e análise minuciosa dos dados inseridos pelos técnicos de campo, logo após a realização de um levantamento ou de uma VRF.

5. Comentários finais e perspectivas

Como resultado principal dos processos componentes do REALT-2018, apresentados neste relatório, serão disponibilizadas no BDG as altitudes normais das Referências de Nível que constituem a RAAP. Como enfatizado anteriormente, este tipo de altitude segue as recomendações internacionais sobre a definição da componente física do sistema de referência vertical para o SIRGAS. Os cálculos e análises desenvolvidos durante o reprocessamento da RAAP caracterizam-se pela robustez, envolvendo um maior número de variáveis qualitativas em relação aos procedimentos anteriores. A inserção de novos parâmetros proporcionou o cálculo de altitudes com significado físico e preparou a rede para as ações futuras preconizadas pelo SIRGAS sobre a unificação do sistema altimétrico das Américas. Cabe ressaltar que as diferenças constatadas entre as novas altitudes normais e as altitudes vigentes no BDG até julho de 2018 ocorrem, em grande parte, pela inserção de novas linhas e pelo processo de depuração da rede, que ocasionou uma geometria diferente para o ajustamento. Esta influência é significativamente maior do que a decorrente da utilização de diferenças de geopotencial e conversão dos valores finais ajustados em altitudes normais.

As novas altitudes normais mantêm-se referidas aos referenciais altimétricos atualmente vigentes no Brasil, Imbituba e Santana, ambos definidos, em cada caso, a partir de um único valor do NMM calculado com dados coletados em uma única estação maregráfica. Visando a substituição destes referenciais locais e nacionais por sistemas definidos e realizados em âmbito global, estudos estão em andamento para a

definição do chamado Sistema Internacional de Referência para as Altitudes (IHRS, *International Height Reference System*) e a respectiva realização (materialização) global (IHRF, *International Height Reference Frame*). Inicialmente, estão sendo selecionadas estações de rastreio contínuo GNSS vinculadas às respectivas redes verticais de cada país e que possuam adequada densificação gravimétrica em raios pré-estabelecidos. O Brasil vem contribuindo, neste primeiro momento, com 6 estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), e está direcionando seus esforços para fornecer a adequada densificação gravimétrica pré-estabelecida, bem como a conexão de cada estação à RAAP. As estações pré-selecionadas no Brasil foram: Imbituba (SC), Presidente Prudente (SP), Cuiabá (MT), Marabá (PA), Fortaleza (CE) e Brasília (DF). Assim, vislumbra-se que a próxima realização da componente vertical do SGB, em alguns anos, já seja referida ao IHRS/IHRF.

Referências

ALENCAR, J. C. M. Sistema Nacional de Nivelamento de 1a Ordem. In: Conferência Nacional de Geociências, 1., 1968, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IBGE, 1968. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_artigos. Shtm>.

ALENCAR, J. C. M. Datum Altimétrico Brasileiro. Cadernos de Geociências, v.5, 1990. p.69-73. IBGE, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/ geociencias/geodesia/artigos/1990- datum%20altimetrico%20brasileiro.pdf

BEATTIE, D. S. 1987. Program GHOST User Documentation. Geodetic Survey of Canada, Ottawa.

BOWIE, W; AVERS, H. G. Fourth General Adjustment of the Precise Level Net in the United States and the Resulting Standard Elevations. Special Publication No. 18, Washington: U. S. Coast and Geodetic Survey, 328 p. 1914.

FEATHERSTONE, W. E. Prospects for the Australian Height Datum and Geoid Model. In: ÁDÁM, J.; SCHWARZ, K.-P. (Ed.). Vistas for Geodesy in the New Millennium. Berlin: Springer, 2002. p. 96-101. xvii, 620 p. (IAG Symposia, v. 125). Também disponível em: <http://www.cage.curtin.edu.au/~geogrp/pubs.html> Acesso em: 28/10/2005.

FORSBERG, R.; TSCHERNING, C. C. An overview manual for the GRAVSOFT Geodetic Gravity Field Modelling Programs. 2.ed. 2008.

FREITAS, S.R.C.; BLITZKOW, D. 1999. Altitudes e Geopotencial. IgeS Bulletin, Milan, Special Issue for South America, 9: 47-62.

GUIMARAES, G.N; BLITZKOW, D. 2011. Problema de Valor de Contorno da Geodésia: Uma Abordagem Conceitual. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v.17, nº4, p.607-624, out-dez.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ H. Physical Geodesy. 2. Edition. Wien: Springer, 2006. xvii, 403 p.

IAG (2015). IAG Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRS). Disponível em <https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_ Resolutions_2015.pdf>, acesso em 06.05.2018.

IBGE. 2017. 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>

IBGE. Ajustamento simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. 2011. 60 p. IBGE, Rio de Janeiro. Disponível em: <http:// www.ibge.gov.br / home / geociencias / geodesia / altimetrica.shtm>.Acesso em: jun.2015.

IHDE, J.; Sanchez, L.; BARZAGHI, R.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; MARTI, U.; PAIL, R.; SIDERIS, M. Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRS). Surveys in Geophysics, v. 38, n. 3. 2017.

KRAKIWSKY, E. J.; MUELLER, I. I. Systems of Height. Columbus: OSU, 1965. xxv, 157 p. (Report, Dept. of Geodetic Science, n. 60).

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. Disponivel em <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-017-9409-3>.

LUZ, R. T. 2008. Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS. Editora UFPR, Curitiba/PR, 2008, 228 páginas. Também disponível em: <http:// www.sirgas.org / fileadmin / docs / Roberto_Teixeira_Luz_Tese_de_Doutorado.pdf>.

MORITZ, H. Advanced Physical Geodesy. Karlsruhe: Wichmann, 1980. xiii, 500 p.

SIDERIS, M. G. Regional Geoid Determination. In: VANÍCEK, P.; CHRISTOU, N. T. (Ed.). Geoid and Its Geophysical Interpretations. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 77-94. xvi, 343 p.

SIRGAS. Reporte 2005, SIRGAS-GTIII. 2005. 39 p. Disponível em: <http:// www.sirgas.org / fileadmin / docs / Boletines / Bol09 / 23_Sanchez_ReporteGTIII. pdf>

SIRGAS. Reporte 2007-2008 – Boletin Informativo No.13. 2008. Disponível em: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Boletin_SIRGAS_N0._13_Reporte_2007-2008.pdf>, acesso em 25/05/2018.

STEEVES, R. 1983. *Mathematical models for use in the readjustment of the North American geodetic networks, Thecnical Report 1, GSD*, Canada, 33 páginas.

SUBIZA PIÑA, W. H. e SOUSA, M. A., 2001. O Estado da Base de Dados Gravimétricos do Observatório Nacional (BDG-ON) Situação em junho, 2001. Brazilian Journal of Geophysics (Soc. Bras. Geofísica, Rio de Janeiro Vol.19, N. 3, p. 325-328.

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

Equipe Técnica

Diretoria de Geociências

Coordenação de Geodésia
Sonia Maria Alves Costa

Planejamento e coordenação técnica geral da publicação
Roberto Teixeira Luz

Desenvolvimento de programas computacionais específicos
Roberto Teixeira Luz

Análise e Ajustamento da Rede Altimétrica
Jéssica Caroline dos Santos Siqueira
Maira Kronemberg Lima

Elaboração do Relatório
Jéssica Caroline dos Santos Siqueira
Maira Kronemberg Lima

Revisão do Relatório
Roberto Teixeira Luz

Suporte técnico-gerencial
Valéria Guimarães Carvalho
Jorge Ricardo Muniz Kwasinski Filho
Patrick Otto Busch (estagiário)
Roberta Gomes de Oliveira(estagiária)
Luiz Paulo Souto Fortes (atualmente aposentado)
Salomão Soares
Everton Gomes dos Santos
Antonio da Cruz Castro

Aprovação do Relatório
Sonia Maria Alves Costa

Colaboração externa

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas

Instituto Militar de Engenharia (IME)
Prof. Dr. Leonardo Castro de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Prof. Dr. Gabriel Guimarães

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
Prof. Dr. Luiz Paulo Souto Fortes

Se o assunto é **Brasil**,
procure o **IBGE**.

/ibgecomunica /ibgeoficial /ibgeoficial /ibgeoficial

www.ibge.gov.br 0800-721-8181