

Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais

2ª edição

Presidente da República
Jair Messias Bolsonaro

Ministro da Economia
Paulo Roberto Nunes Guedes

Secretário Especial de Fazenda
Waldery Rodrigues Junior

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE

Presidente
Susana Cordeiro Guerra

Diretor-Executivo
Fernando José de Araújo Abrantes

ÓRGÃOS ESPECÍFICOS SINGULARES

Diretoria de Pesquisas
Eduardo Luiz G. Rios Neto

Diretoria de Geociências
João Bosco de Azevedo

Diretoria de Informática
David Wu Tai

Centro de Documentação e Disseminação de Informações
Marise Maria Ferreira

Escola Nacional de Ciências Estatísticas
Maysa Sacramento de Magalhães

UNIDADE RESPONSÁVEL

Diretoria de Geociências
Coordenação de Geodésia
Sonia Maria Alves Costa

Ministério da Economia
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências
Coordenação de Geodésia

Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais

2ª edição



Rio de Janeiro
2019

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE

Av. Franklin Roosevelt, 166 - Centro - 20021-120 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

ISBN 978-85-240-4502-8

© IBGE. 2019

1ª edição - 2018

2ª edição - 2019

Capa/ilustração

Fabio Muniz de Moura - Gerência de Editoração - CDDI

Ficha catalográfica elaborada pela Gerência de Biblioteca e Acervos Especiais do IBGE

Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais / IBGE,
Coordenação de Geodésia. - 2. ed. - Rio de Janeiro : IBGE, 2019.

56p.

ISBN 978-85-240-4502-8

1. Geodésia. 2. Redes (Geodésia). 3. Sistema de posicionamento global. 4. Altitudes. 5. Brasil. I. IBGE. Coordenação de Geodésia.

Gerência de Biblioteca e Acervos Especiais
RJ/IBGE/2019

CDU 528.38(81)
GEOD

Impresso no Brasil / *Printed in Brazil*

Sumário

Apresentação	5
Introdução	7
Notas técnicas	9
Antecedentes conceituais e históricos	9
Sistemas geodésicos de referência vertical	9
Altitudes físicas	9
<i>Datum</i> vertical	13
Desenvolvimento espacial e cronológico da Rede Altimétrica de Alta Precisão	13
Preparação do Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais - REALT 2018	17
Organização dos dados iniciais	17
Ferramentas computacionais utilizadas	20
Programa IDNOS	20
Programa Monta_INTCOBS	20
Programas GEOGRID e PREDGRAV	21
Programa INTCOBS_geopotencial	21
GHOST	21
Programa SIGMA_DESN_GHOST	22

Identificação preliminar das linhas internodais e análise temporal das estações	22
Fechamento e análise dos circuitos por meio das linhas internodais	23
Ajustamento da rede internodal.	25
Ajustamentos preliminares, análise e correção das novas inconsistências.	26
Análise e correção de coordenadas planimétricas das estações . .	28
Interpolação dos dados de gravidade	29
Cálculo dos números geopotenciais referentes aos <i>Data</i> de Imbituba e Santana	33
Cálculo das diferenças de número geopotencial	34
Cálculo dos números geopotenciais e altitudes normais	35
Ajustamento das diferenças de número geopotencial do bloco principal	35
Ajustamento do bloco principal com a correção normal-ortométrica.	39
Ajustamento das linhas desconsideradas após fechamento dos circuitos	40
Ajustamento da Rede Altimétrica do Amapá	42
Análise, crítica e liberação das informações descritivas	44
Comentários finais e perspectivas	45
Referências	47
Apêndice	
Ajustamento das linhas remanescentes do REALT-2018	51

Convenções

-	Dado numérico igual a zero não resultante de arredondamento;
..	Não se aplica dado numérico;
...	Dado numérico não disponível;
x	Dado numérico omitido a fim de evitar a individualização da informação;
0; 0,0; 0,00	Dado numérico igual a zero resultante de arredondamento de um dado numérico originalmente positivo; e
-0; -0,0; -0,00	Dado numérico igual a zero resultante de arredondamento de um dado numérico originalmente negativo.

Apresentação

A componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB, isto é, o sistema de referência para medição de altitudes no Território Nacional, é realizada por meio de sua Rede Altimétrica de Alta Precisão, comumente denominada RAAP. Ela é formada pelas estações geodésicas altimétricas tradicionalmente denominadas Referências de Nível (RRNN), implantadas ao longo da malha viária por todo o País. Os desníveis entre as referências de nível sucessivas são observados por meio do chamado nivelamento geométrico de alta precisão, que permite que a altitude de cada uma delas seja obtida com incerteza de poucos milímetros em relação às altitudes das estações vizinhas. A reformulação dos procedimentos de análise e tratamento introduzida pela Coordenação de Geodésia do IBGE nos últimos quatro anos, apresentada neste documento, culmina com o cálculo e a divulgação das mais rigorosas altitudes da RAAP, estabelecendo, assim, um novo nível de qualidade da informação vertical do Sistema.

A publicação apresenta a metodologia desenvolvida para uma completa revisão da rede de circuitos e incorporação da informação gravimétrica aos desníveis nivelados, os resultados referentes ao reajustamento da RAAP em termos de seus números geopotenciais, bem como uma análise comparativa das novas altitudes normais em relação aos ajustamentos anteriores. Em relação à versão disponibilizada em 2018, apenas no portal do IBGE na Internet, a análise dos resultados é complementada, nesta nova edição do documento, com a inclusão da comparação em relação às informações maregráficas históricas no litoral brasileiro e com o detalhamento das linhas ajustadas individualmente.

João Bosco de Azevedo

Diretor de Geociências

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, a referência é dada pelas estações da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema, denominadas Referências de Nível (RRNN). À medida que novas linhas de nivelamento são agregadas à Rede e novas técnicas de medição e processamento são desenvolvidas, as altitudes de suas referências de nível 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 valores observados e interpolados 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 procedimentos anteriores (AJUSTAMENTO..., 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-normais¹ (ou normais-ortométricas). Cumpre ressaltar que a utilização da gravi-

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

dade 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, conforme assinalam Bowie e Avers (1914, p. 51). Entretanto, para esses 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.

A decisão de iniciar um novo ajustamento, em 2015, teve como principal justificativa a necessidade de modernização da componente vertical do SGB, em consonância com as recomendações científicas emanadas do International Association of Geodesy Executive Committee 2011-2015 (2015), bem como de divulgação de altitudes com significado físico aos usuários do SGB, aliadas 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 de todas as informações envolvidas. Para o ajustamento dos desníveis geopotenciais da Rede, manteve-se o *software* canadense GHOST, utilizado no ajustamento de 2011.

Ao longo desta publicação, 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, entre outros aspectos.

Notas técnicas

Antecedentes conceituais e históricos

Sistemas geodésicos de referência vertical

Os elementos principais de um Sistema Geodésico de Referência Vertical (SGRV) são as coordenadas verticais – 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 as coordenadas verticais (IHDE et al., 2017). Tradicionalmente, a definição e a realização dos SGRVs continentais e nacionais baseava-se na adoção do Nível Médio do Mar (NMM) como *datum* vertical, representando 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.

Altitudes físicas

Os números geopotenciais (C) servem de base para o cálculo das altitudes físicas (H), que são as coordenadas adequadas para uso no posicionamento vertical, pois se vinculam, 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 essas coordenadas verticais, as chamadas altitudes geométricas ou elipsoidais (h), que resultam dos levantamentos com os Sistemas Globais de Navegação por Satélites (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 o rigor no levantamento e fechamento em circuito, haverá um resíduo não aleatório nesse fechamento porque diferentes superfícies equipotenciais não são paralelas entre si nas posições dos níveis, sendo suas linhas de colimação tangentes à respectiva superfície equipotencial do campo da gravidade (FREITAS; BLITZKOW, 1999).

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

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

sendo C_P o número geopotencial de um ponto P qualquer, constituindo-se em uma grandeza física independente do trajeto entre O e P. Essa 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:

$$\Delta C_{AB} = C_B - C_A = -(W_B - W_A) \approx g_{AB}^{\text{obs}} \Delta H_{AB}^{\text{obs}} \quad (2)$$

cujo ajustamento resulta nos números geopotenciais.

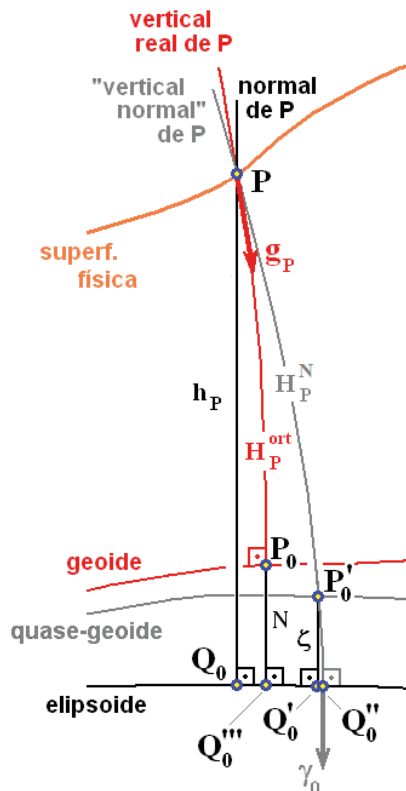
A adoção direta do número geopotencial como descritor rigoroso da posição vertical não é adequada para a maioria dos usuários devido à unidade em que os mesmos devem ser expressos (kilocal.metro ou m^2/s^2). A fim de contornar essa dificuldade, se faz necessária a conversão dos números geopotenciais em altitudes físicas, que são expressas em metros:

$$H^{\text{física}} = \frac{C}{G} \quad (3)$$

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

Com foco nas atividades desenvolvidas para o reajustamento altimétrico 2018, serão abordados apenas três tipos de altitudes físicas neste documento: ortométrica, normal e normal-ortométrica.

Figura 1 - Elementos envolvidos na definição das altitudes físicas



Fontes: MORITZ, H. *Advanced Physical Geodesy*. Karlsruhe: Wichmann; Tunbridge: Abacus, 1980. p. 9, 13. (Sammlung Wichmann: Neue Folge: Buchreihe, 13). 2. SIDERIS, M. G. Regional geoid determination. In: VANÍČEK, P.; CHRISTOU, N. T. (ed.). *Geoid and its geophysical interpretations*. Boca Raton: CRC Press, c1994. p. 80. 3. TORGE, W. *Geodesy*. 3rd. compl. rev. and ext. ed. Berlin: W. de Gruyter, 2001. p. 216-217. Adaptados.

A altitude ortométrica é a distância medida entre o geoide e o ponto de interesse ao longo da linha vertical (Figura 1). Essa 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 o 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:

$$C_P = \int g dH = g_m \int dH \therefore H_P^{\text{ort}} = \frac{C_P}{g_{\text{vert}}} \quad (4)$$

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, conseqüentemente, da respectiva altitude ortométrica rigorosa. A fim de contornar tal 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 – caso dos ajustamentos anteriores da Rede Altimétrica do SGB, em que não havia informação gravimétrica suficiente para o cálculo das respectivas diferenças de geopotencial. Naquelas oportunidades, 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 dessa forma são denominadas normais-ortométricas, ou ortométricas-normais (KRAKIWSKY; MUELLER, 1965, p. 109).

Assim, no caso das referências de nível (RRNN) do SGB, até 30.07.2018, eram disponibilizadas para os usuários as altitudes ortométricas do tipo normal, mas, a partir da divulgação dos resultados do reajustamento altimétrico aqui apresentado, o Banco de Dados Geodésicos - BDG vem disponibilizando altitudes normais, seguindo as recomendações do Sistema de Referência Geocêntrico para las Américas - SIRGAS (TALLER DEL SIRGAS-GTI, 2008, p. 13).

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

$$H^N = \frac{C}{\gamma_{vert}} \quad (5)$$

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

$$\gamma_0 = \gamma_a \frac{1 + k \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, k = \frac{b \gamma_b}{a \gamma_a} - 1 \quad (7)$$

sendo a , b , m , α , γ_a e γ_b parâmetros associados ao sistema geodésico de referência (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:

$$N = h - H^{ort} \quad (8)$$

$$\zeta = h - H^N \quad (9)$$

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

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

sendo N a altura geoidal; ζ , a anomalia de altitude; e Δg_B , a anomalia Bouguer, aproximada pela diferença entre os valores médios na vertical da gravidade real e normal (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006, p. 326).

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 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.

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 Nível Médio do Mar 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 Nível Médio do Mar (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 Rede Altimétrica de Alta Precisão referiam-se, provisoriamente, ao *Datum* de Torres, no Rio Grande do Sul, 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, concluiu-se o terceiro ajustamento da Rede, quando, então, suas altitudes passaram a se referir ao *Datum* de Imbituba, em Santa Catarina.

A primeira RN da Rede em Imbituba, 4X, foi estabelecida em junho de 1946, como uma RN comum, já que não se antecipava, àquela época, que o marégrafo posteriormente instalado definiria o futuro *datum* vertical da Rede. Em 1948, o serviço geodésico internacional (Inter American Geodetic Survey - IAGS) da então agência militar de mapeamento dos Estados Unidos, Defense Mapping Agency - DMA², 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, por meio da média dos NMMs anuais de 1949 a 1957, referida à RN 4X.

Quando iniciou a implantação da Rede no Estado do Amapá, em 1980, 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.

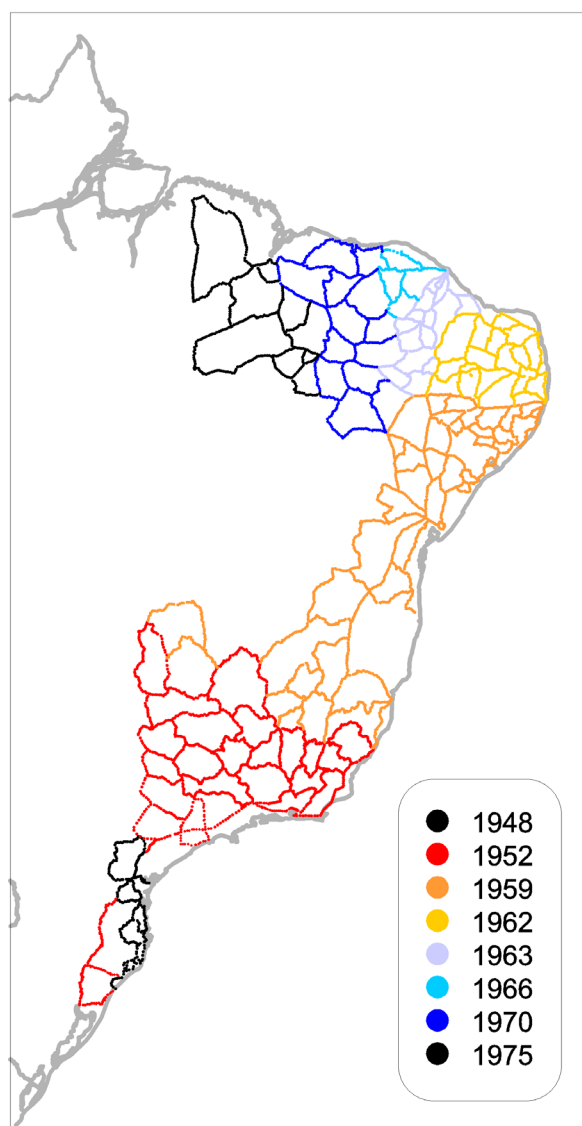
Desenvolvimento espacial e cronológico da Rede Altimétrica de Alta Precisão

O estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão, 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

² Posteriormente, National Imagery and Mapping Agency - NIMA; hoje, National Geospatial-Intelligence Agency - NSA.

- SGE (ALTITUDES..., 1950) e Instituto Geográfico e Geológico - IGG, de São Paulo, (NIVELAMENTO..., 1962). Do Sul, a Rede progrediu, inicialmente, em direção ao nordeste 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 Rede foi direcionada ao interior do País, à substituição dos trechos específicos em que foram aproveitadas 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 de Imbituba (a partir de 1959)



Fonte: ALENCAR, J. C. M. de. *Sistema nacional de nivelamento de 1ª ordem*. Rio de Janeiro: IBGE, 1968. Trabalho apresentado na I Conferência Nacional de Geociências, realizada no Rio de Janeiro, em 1968. Disponível em: <https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/ate-1989/3138-sistema-nacional-de-nivelamento-de-1a-ordem-1968.html>. Acesso em: jul. 2019. Adaptado.

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

Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Preparação do Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais - REALT 2018

Organização dos dados iniciais

Os dados brutos de nivelamento são compostos pelas informações de desnível entre RRNN sucessivas, oriundas de levantamentos de campo executados pelo IBGE a partir de 1945, por meio do método clássico de nivelamento geométrico de alta precisão (duplos desníveis entre as estações niveladas: nivelamento/contra-nivelamento) com nível ótico ou digital; pelas 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). A Figura 4 apresenta um exemplo atual com a formatação de entrada dos dados de nivelamento.

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 2 142 RRNN no arquivo de desníveis do bloco principal do REALT 2018, referido ao *Datum* de Imbituba, conforme Figura 5. Neste conjunto de novas observações, encontra-se a linha de 130 km que, em 2013, corrigiu a inconsistência detectada ao sul de Manaus – os detalhes são apresentados no Apêndice.

Cabe ressaltar que o elevado índice de destruição das estações da Rede Altimétrica de Alta Precisão leva à necessidade de estabelecimento de novas linhas ao longo de rodovias onde 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, conforme abordado no tópico **Identificação preliminar das linhas intermodais e análise temporal das estações**.

Figura 4 - Exemplo de arquivo de dados de nivelamento empregado no processo de ajustamento

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					
	V12	27050					
	1114	+	2049	2	4326R	3122D	N 3
	R	26971					
	V12	29018					
	1114	-	2047	2	4326R	3122D	C 3
	R	27329					
	V12	28127					
	1114	-	798	2	3122D	9303S	N 3
	R	28202					
	V12	27404					
	1114	+	798	2	3122D	9303S	C 3
	R	61095					
	V12	52623					
	1114	+	8472	14	9303S	9303T	N 3
	R	52804					
	V12	61274					
	1114	-	8470	14	9303S	9303T	C 3
	R	26967					
	V12	24873					
	1114	+	2094	9	9303T	3122G	N 3
	R	25050					
	V12	27142					
	1114	-	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

Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Figura 5 - Desníveis inseridos no bloco principal do REALT 2018

Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Os dados de gravimetria utilizados nesse processo são oriundos de levantamentos gravimétricos realizados pelo IBGE e do Banco Nacional de Dados Gravimétricos - BNDG, este gerenciado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP a partir de levantamentos próprios, bem como de instituições como Petrobrás, Furnas Centrais Elétricas, Observatório Nacional, Universidade de São Paulo - USP e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (Serviço Geológico do Brasil) entre outras.

As coordenadas planimétricas das RRNN podem ser oriundas de cartas topográficas nas escalas em que o IBGE produz ou, modernamente, de levantamentos GNSS, e as coordenadas das estações gravimétricas do IBGE são obtidas apenas por levantamentos GNSS. A Figura 6 apresenta um exemplo com a formatação de entrada dos dados de coordenadas das RRNN da Rede.

Figura 6 - Parte do arquivo de coordenadas de RRNN empregado no processo de ajustamento

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

Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

O Banco de Dados Geodésicos contém informações sobre descrição dos marcos, localização, situação de conservação, foto, coordenadas, datas de levantamento, cálculo e visita, entre outras. Tais informações são essenciais para a adequada utilização pelos usuários do Sistema Geodésico Brasileiro e foram objeto de revisão e análise paralelamente ao ajustamento da RAAP, a fim de garantir a integridade das informações disponíveis no Banco.

Ferramentas computacionais utilizadas

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 a 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).

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, $4 \text{ mm.K}^{1/2}$. 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.

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. Ele 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. Ele foi disponibilizado aos participantes do Projeto SIRGAS (REUNIÓN DEL COMITÉ EJECUTIVO DE SIRGAS, 2005), mas sua utilização no REALT 2018 foi inviabilizada em virtude do tempo excessivamente longo consumido para o cálculo de cada ponto, incompatível, portanto, com a necessidade dos inúmeros testes descritos no tópico **Interpolação dos dados de gravidade**.

Programa INTCOBS_geopotencial

Calcula as diferenças de número geopotencial das seções, a partir dos arquivos de desníveis e gravidade resultantes dos programas abordados nos tópicos anteriores. Este programa ainda analisa as coordenadas planimétricas, por meio da comparação entre as distâncias nivelada e calculada; os desníveis; as altitudes; e a 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 a seguir, não está preparado para tratar números geopotenciais em função da diferença de escala entre número geopotencial e altitude, que poderia afetar o desempenho das rotinas de identificação de possíveis *outliers*. Em princípio, isso não constitui dificuldade significativa, pois as diferenças de geopotencial poderiam ser submetidas ao GHOST como se fossem desníveis, com a devida correção de escala. Para tanto, 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.

GHOST

O 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 (Geodetic Survey Division - GSD), 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 70 400 desníveis e quase 66 900 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, 1 500 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; e
- 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 a 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. Essa 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 padrões, para toda a Rede.

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 tópico **Programa INTCOBS geopotencial**.

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

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 destas em suas posições originais e, assim, 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 esse “erro” de fechamento temporal resulte em um valor acima da tolerância estabelecida (ESPECIFICAÇÕES..., 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 LDNOS identificou 991 seções para verificação temporal (Figura 7); no entanto, para uma análise detalhada e completa de cada caso, avaliou-se um total de 2 302 seções.

Figura 7 - Trechos da RAAP submetidos à análise temporal e atribuição de códigos de nova posição

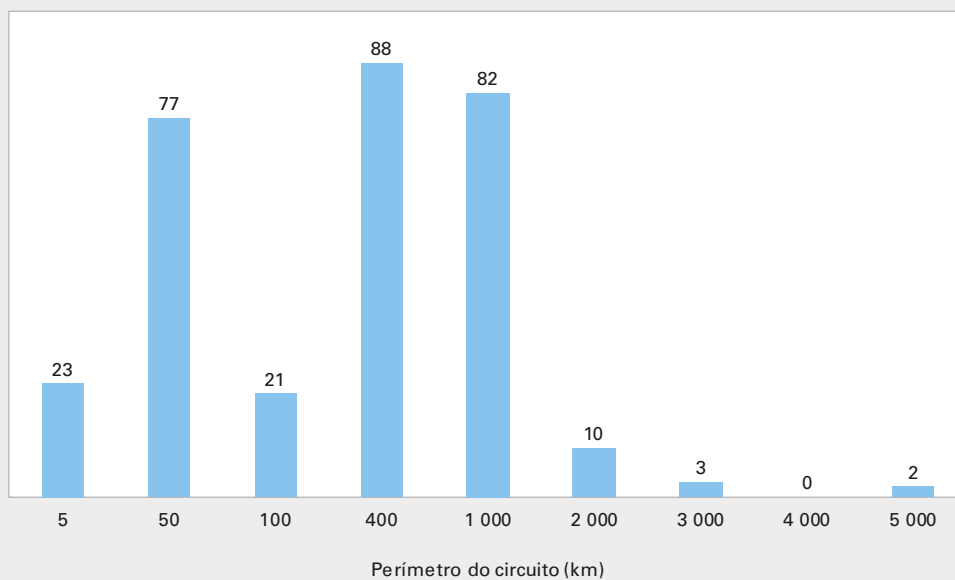


Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Fechamento e análise dos circuitos por meio das linhas internodais

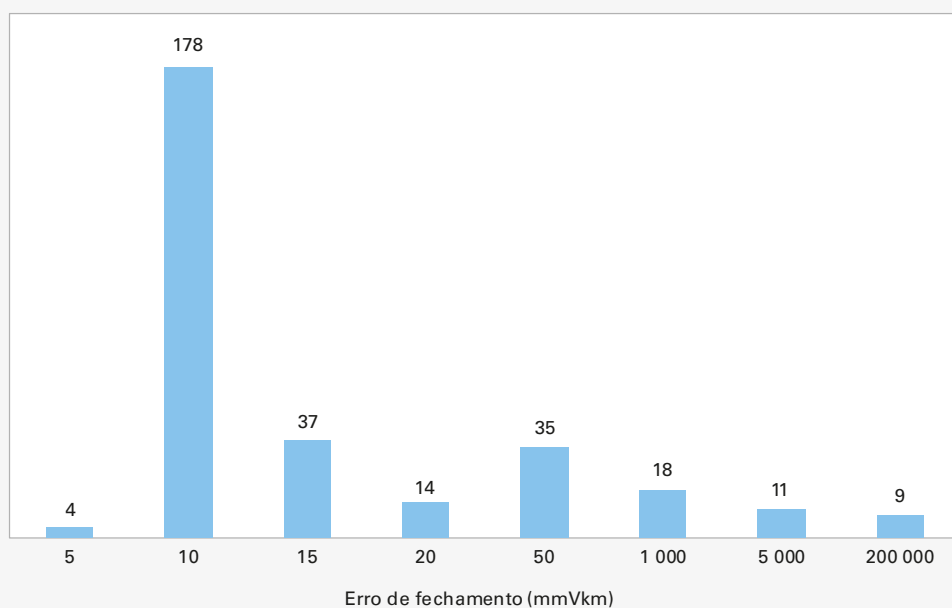
O cálculo do erro de fechamento dos circuitos faz parte do controle de qualidade da Rede Altimétrica de Alta Precisão, conforme especificações vigentes (ESPECIFICAÇÕES..., 2017). Para o REALT 2018, o IBGE optou por proceder uma completa revisão de todos os circuitos da Rede. Após a análise da variação 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 $5 \text{ mm} \cdot K^{1/2}$ para a tolerância. Foram detectados 1 482 circuitos, dos quais aproximadamente 20% apresentaram fechamento acima da tolerância. Os Gráficos 1 e 2 mostram a distribuição de perímetros e fechamentos dos circuitos.

Gráfico 1 - Número de circuitos da Rede Altimétrica de Alta Precisão, com fechamento acima da tolerância, segundo o perímetro do circuito



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Gráfico 2 - Número de circuitos da Rede Altimétrica de Alta Precisão, com fechamento acima da tolerância



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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 inconsistência não pode ser corrigida, os respectivos desníveis foram retirados do ajustamento do bloco principal da RAAP, evitando possível contaminação dos resultados. Aproximadamente 5 468 RRNN, ou 7,5% da Rede, foram desconsideradas do ajustamento principal (Figura 8). Desse total, pouco mais de 2 400 RRNN referem-se ao grande circuito amazônico (Rondônia, sudeste do Amazonas, oeste do Pará) e aos longos ramais vinculados a esse circuito (Amazonas-Roraima e Rondônia-Acre).

Figura 8 - RRNN rejeitadas no ajustamento principal



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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 $4 \text{ mm.K}^{1/2}$ 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 4 935 linhas internodais resultantes dessa etapa.

Figura 9 - Pontos nodais e respectivas linhas internodais



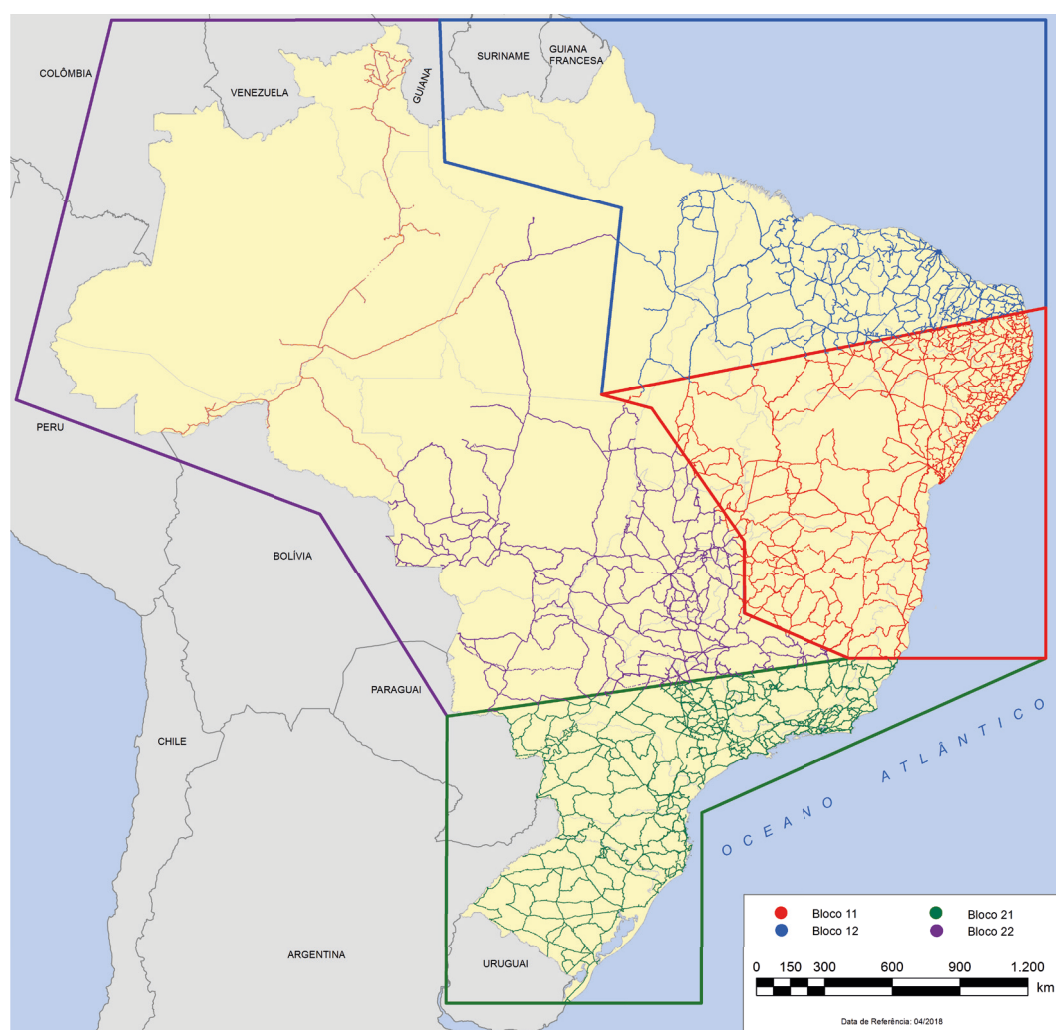
Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Ajustamentos preliminares, 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 realizado em 2011. Para solucionar tal empecilho, realizou-se 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 quatro blocos do GHOST. A Figura 10 apresenta as quatro sub-redes em que o bloco principal da RAAP foi dividido para as análises subsequentes. Após o processamento de cada bloco, as precisões relativas das seções foram calculadas e tratadas da mesma forma utilizada no ajustamento da rede internodal.

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



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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

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, fizeram-se necessárias a análise e a eventual correção de suas coordenadas. Para tal, utilizou-se o programa INTCOBS geopotencial, que indicou, *a priori*, 107 seções com diferenças maiores que 10 km entre distâncias nivelada e calculada a partir das coordenadas planimétricas (Figura 11).

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



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

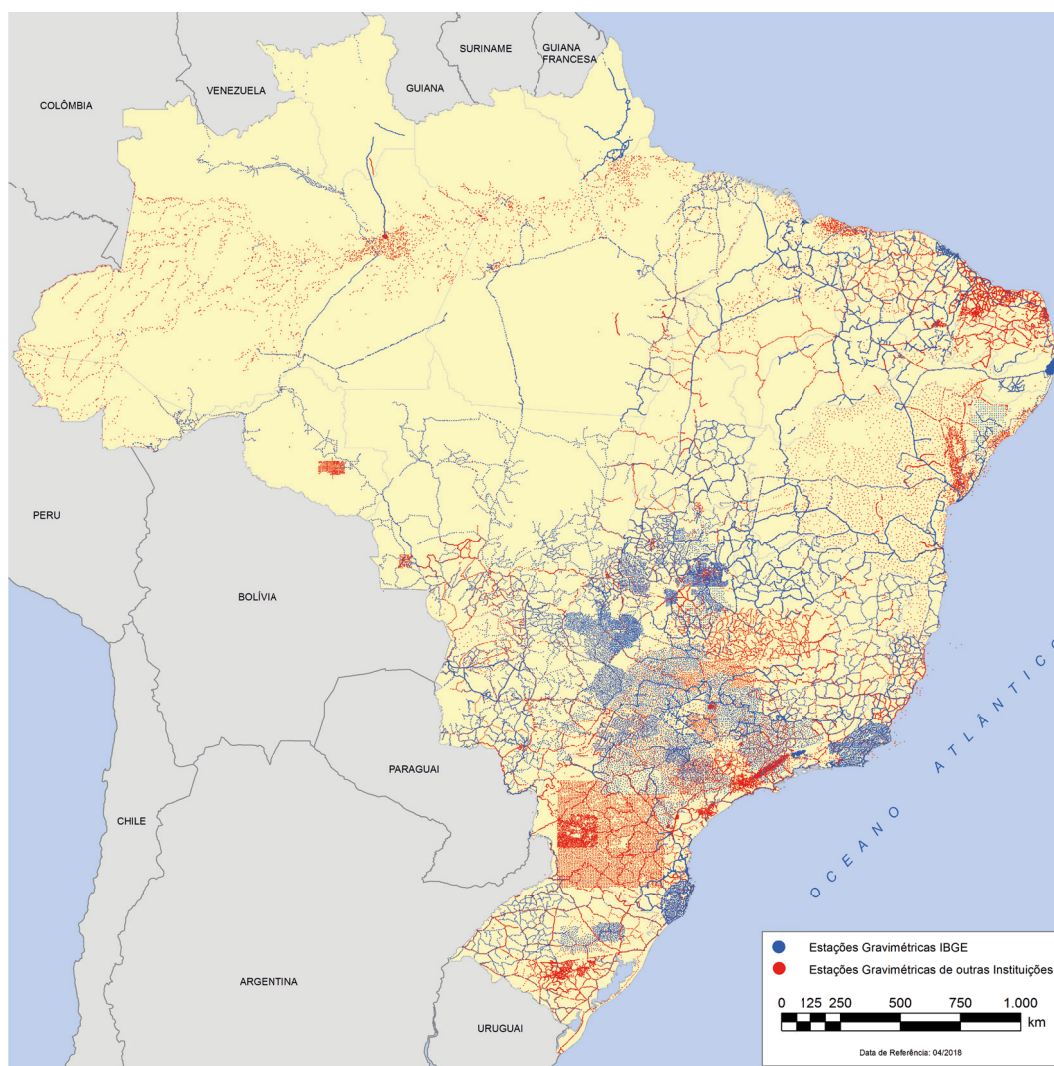
Após algumas simulações com os valores das diferenças das distâncias, identificou-se que apenas aquelas que se apresentaram superiores a 10 km influenciariam no cálculo final das altitudes. Logo, foram corrigidas apenas as coordenadas que provocaram tais diferenças, sendo as demais indicadas em relatórios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

análise futura. Essas discrepâncias ocorrem, em sua maioria, devido à diferença de fonte (método) 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.

Interpolação dos dados de gravidade

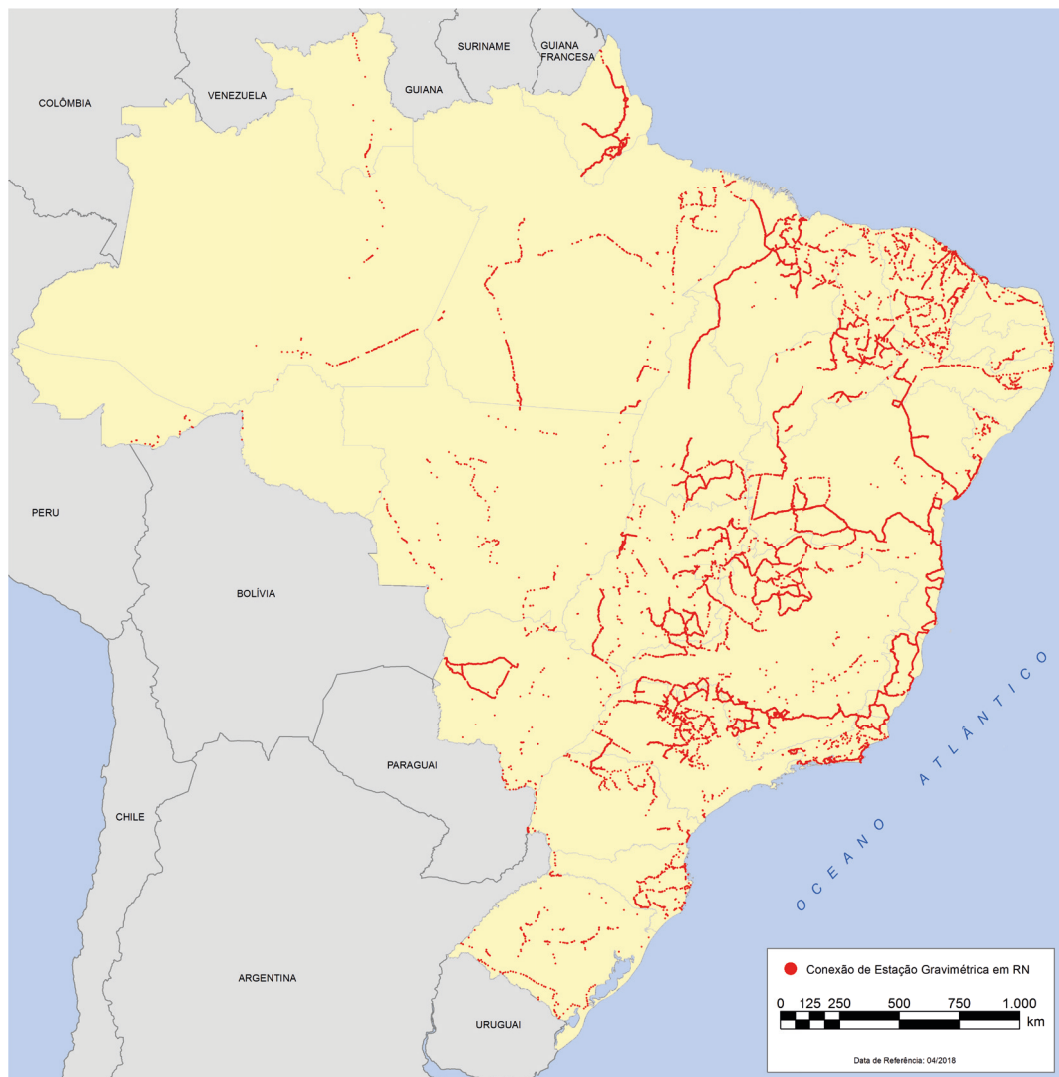
Durante o processo de interpolação dos valores de gravidade das RRNN não gravimetradas pelo IBGE, foram utilizadas 106 mil estações gravimétricas (EEGG) como base para a interpolação, oriundas tanto de levantamentos realizados pelo IBGE, como cedidas por outras Instituições. Sua distribuição espacial 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



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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 2 190; e
- 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 perspectivas de análise.

A primeira metodologia diz respeito à comparação direta entre os valores de gravidade observados em aproximadamente 13 912 referências de nível com conexões gravimétricas com os valores de gravidade dessas mesmas RRNN após a interpolação, empregando os dados e modelos citados. A Figura 14 ilustra os pontos de conexão utilizados nessa análise.

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



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

No histograma apresentado no Gráfico 3, observa-se que o conjunto mais adequado como base para a interpolação do valor de gravidade das RRNN carentes de tal informação 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.

A segunda metodologia empregada na análise dos dados de base para interpolação de gravidade consistiu na escolha aleatória de 1 210 seções de nivelamento em que cada RN possui conexão gravimétrica levantada pelo IBGE (Figura 15).

Os dados empregados nessa 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, tendo como referência a diferença de número geopo-

tencial obtida com os valores de gravidade mensurados. O histograma que ilustra as discrepâncias entre as diferenças de número geopotencial considerando as diferentes fontes de informação gravimétrica é apresentado no Gráfico 4.

Com base nesse 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 dos dados provenientes do IBGE e das demais instituições seja insuficiente, deverá ser analisada a conveniência do emprego dos modelos mencionados.

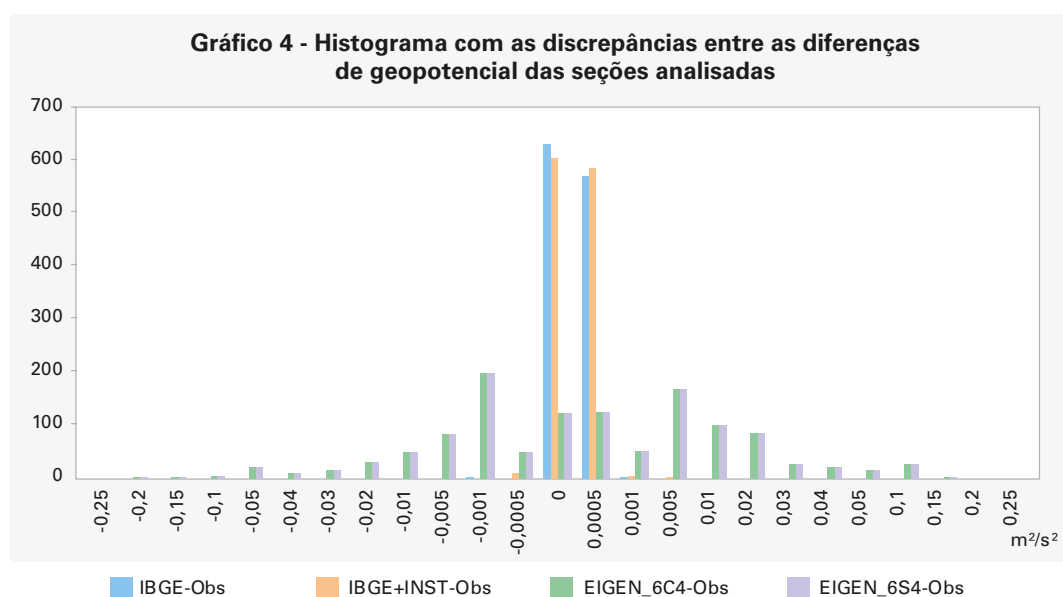
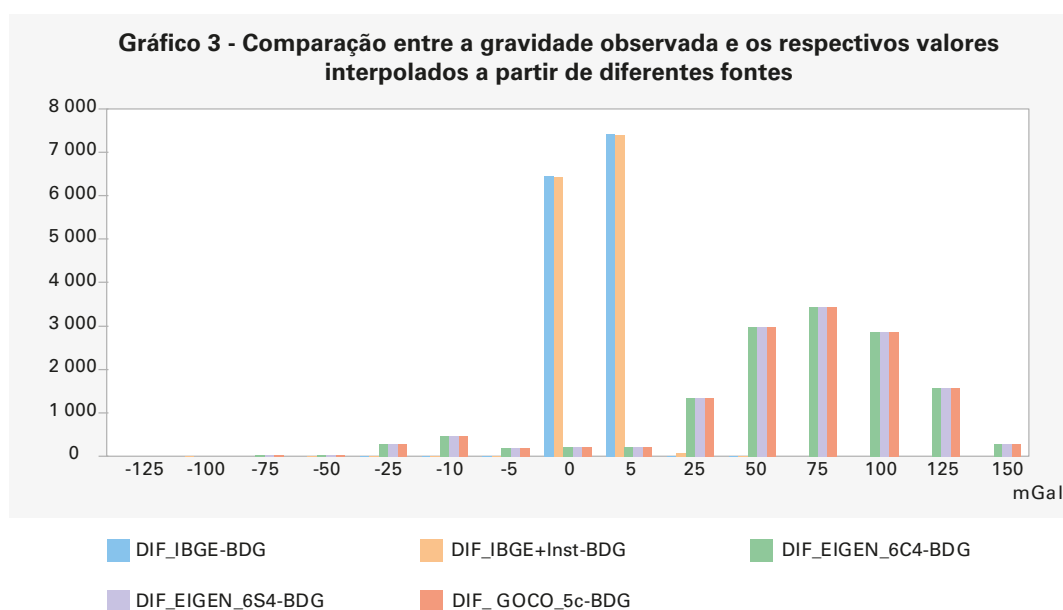


Figura 15 - Distribuição espacial das seções de nivelamento empregadas na análise dos dados gravimétricos de diferentes origens



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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:

$$4X = 84,565 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$9329T = 61,401 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Cálculo das diferenças de número geopotencial

O arquivo de desníveis já formatado para o GHOST e depurado nas etapas descritas anteriormente, bem como 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, conforme a equação (5).

Cálculo dos números geopotenciais e altitudes normais

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 padrões; e os indicadores de qualidade globais. A Tabela a seguir apresenta um resumo desse ajustamento.

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

Indicadores de qualidade	Total
Número de altitudes (RRNN)	66 882
Número de desníveis (seções)	70 426
Número de resíduos (seções formando circuitos)	62 782
Variância da unidade de peso <i>a posteriori</i>	1,186

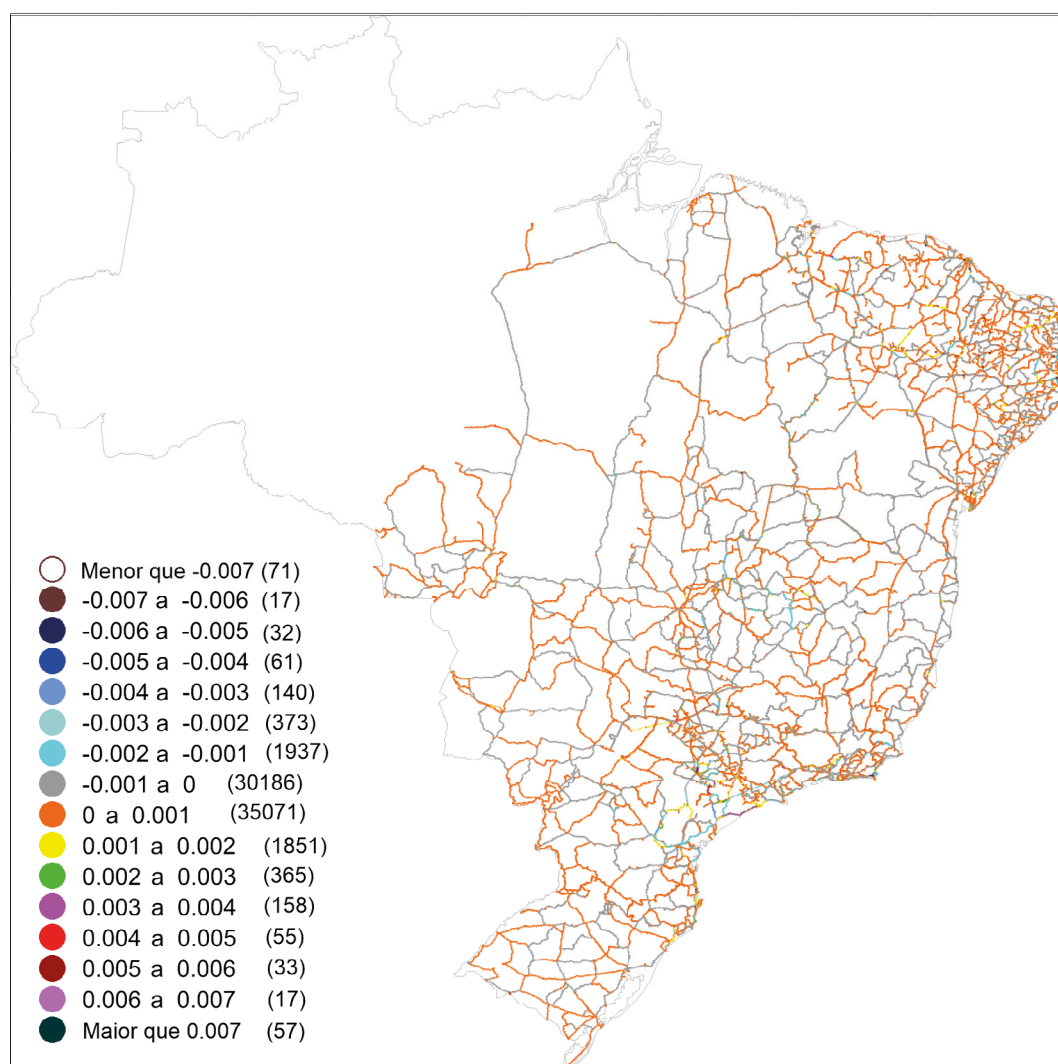
Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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.

A qualidade dos resultados individuais pode ser avaliada mediante a padronização dos resíduos em função das distâncias. Na Figura 16, 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 $-1\text{mm.K}^{1/2}$ a $+1\text{mm.K}^{1/2}$;
- 98,0%, de $-2\text{mm.K}^{1/2}$ a $+2\text{mm.K}^{1/2}$;
- 99,1%, de $-3\text{mm.K}^{1/2}$ a $+3\text{mm.K}^{1/2}$; e
- 99,5%, de $-4\text{mm.K}^{1/2}$ a $+4\text{mm.K}^{1/2}$.

Figura 16 - Erros relativos dos desníveis $[\text{mm.K}^{1/2}]$ após ajustamento do bloco principal do REALT 2018

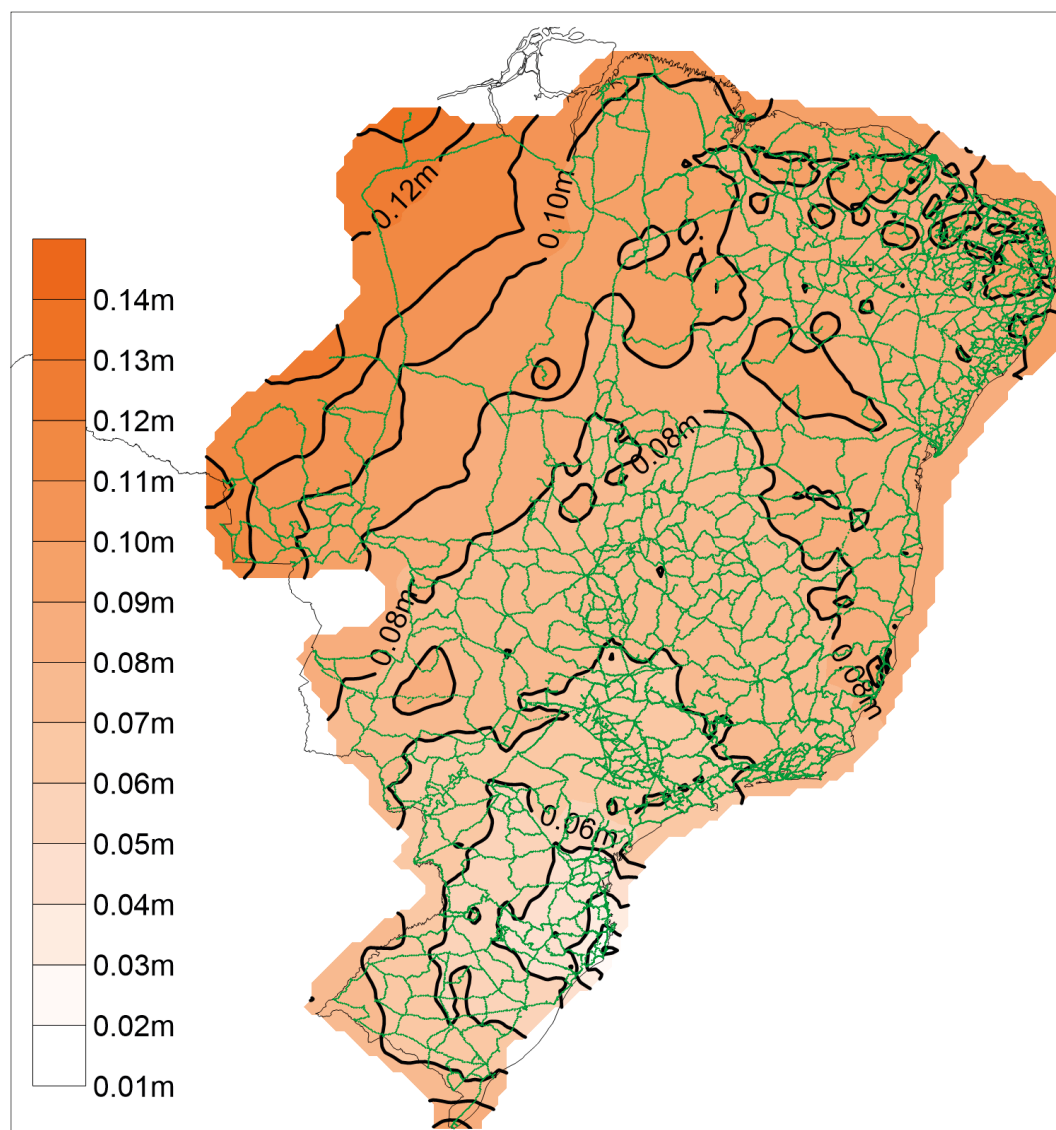


Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Dos 0,5% restantes (seções com resíduos padronizados fora de $\pm 4\text{mm.K}^{1/2}$), grande parte refere-se a seções com comprimentos anômalos (0,01 km) associados às chamadas RRNN de segurança, sem impacto significativo na qualidade das respectivas linhas.

Em termos absolutos, a avaliação da qualidade dos resultados do REALT 2018 pode ser feita com base nos desvios padrões dos números geopotenciais ajustados, apresentados na Figura 17. Observa-se que 55 445 desses valores, ou 87,5%, situam-se no intervalo de 6 cm a 10 cm; 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 17 - Desvios padrões dos números geopotenciais ajustados



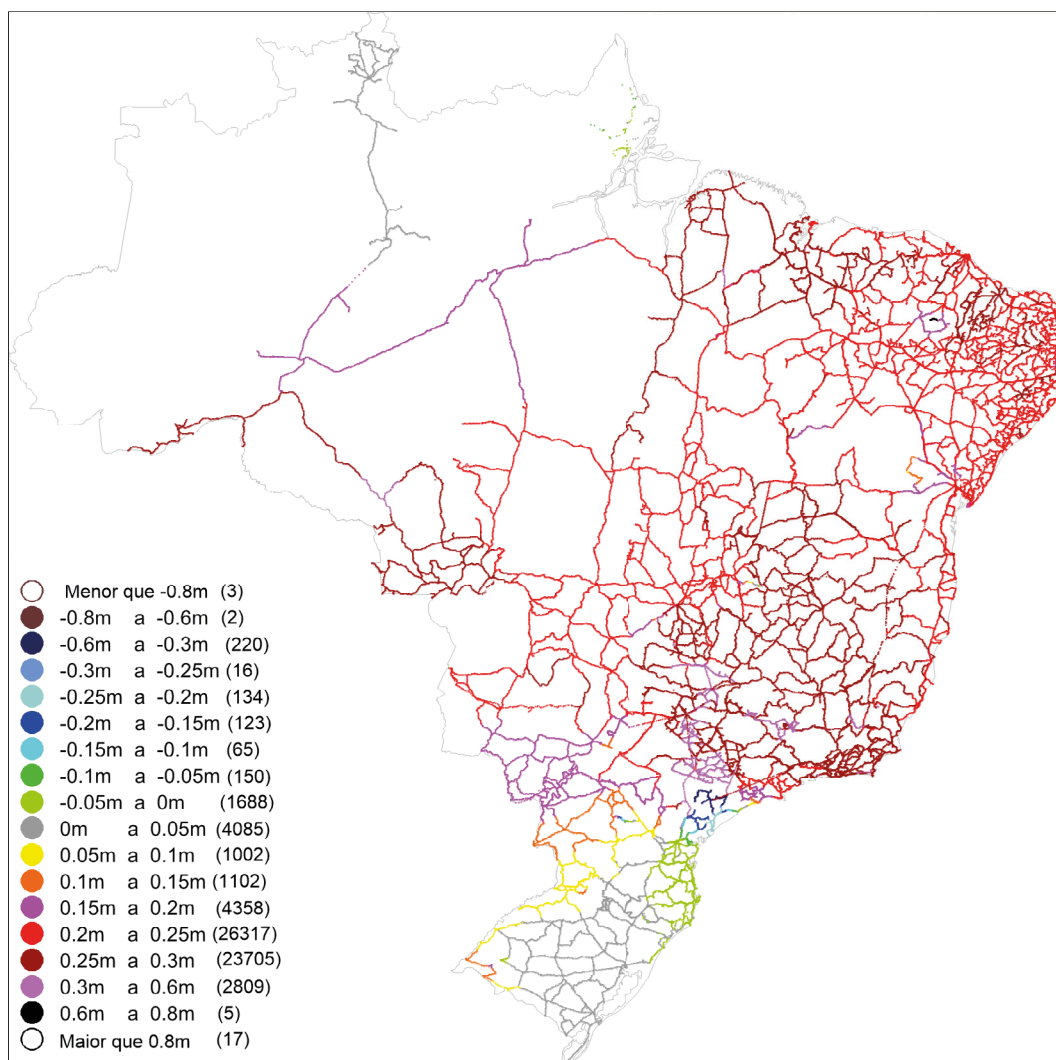
Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

A avaliação do impacto das novas altitudes sobre os usuários do Sistema Geodésico Brasileiro constitui parte essencial no processo de qualificação do REALT 2018. Na Figura 18, observa-se que as altitudes normais de aproximadamente 50 mil RRNN (76%) diferem de +20 cm a +30 cm das altitudes ortométricas-normais vigentes no Banco de Dados até julho de 2018, em grande parte das Regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

Na mesma Figura 18, observa-se a existência de uma descontinuidade nas diferenças de altitudes ao sul de Manaus, no grande ramal amazônico (Humaitá-Venezuela). Tal descontinuidade deve-se à estratégia, adotada no ajustamento de 2011, de exclusão da inconsistência detectada pelo IBGE, em 2009, nessa região. Detalhes sobre o tema são apresentados no Apêndice.

Na Região Sul, a variação em uma faixa diferente de valores, de -5 cm a +20 cm, deve-se à conjunção de dois fatores: a proximidade em relação ao *Datum* de Imbituba e a diferença entre as correções normal e normal-ortométrica para as linhas que sobem a Serra do Mar (grande variação de gravidade, com impacto na correção normal) no sentido leste-oeste (variação insignificante de latitude, anulando a correção normal-ortométrica), como se pode observar na Figura 19.

Figura 18 - Diferenças entre as altitudes normais do REALT 2018 e as altitudes ortométricas-normais vigentes no BDG até 30 de julho de 2018

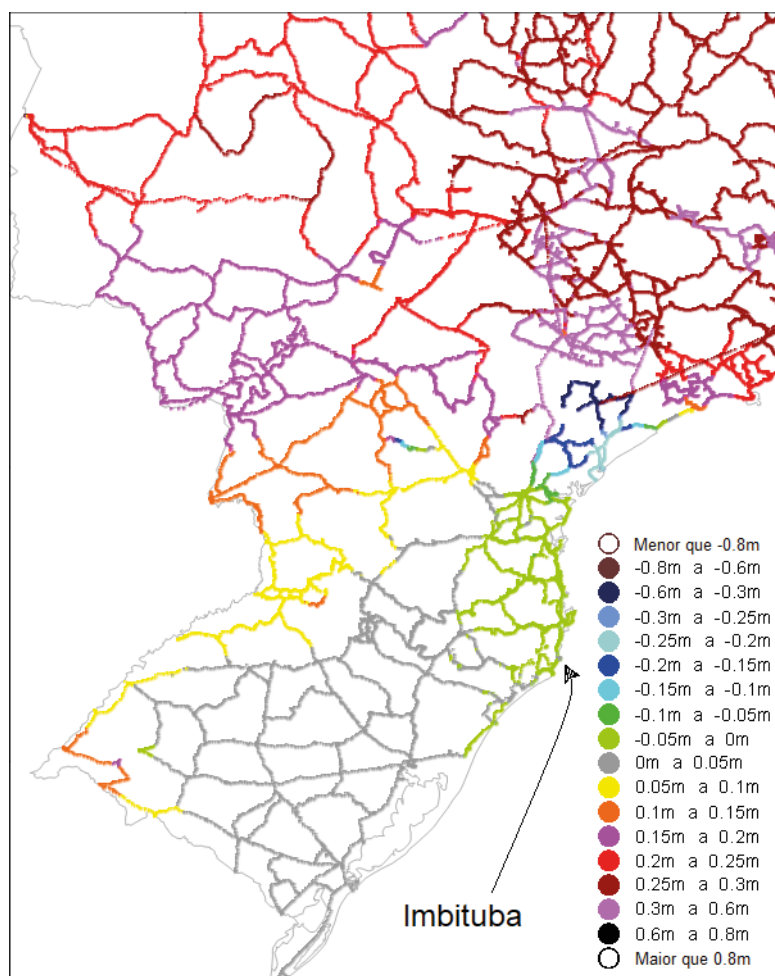


Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Nota: Uma figura mais completa é apresentada no Apêndice, com as linhas ajustadas separadamente.

A Figura 19 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 dos dois ajustamentos.

Figura 19 - Diferenças, no entorno do *Datum* de Imbituba, entre as altitudes normais do REALT 2018 e as ortométricas-normais vigentes no BDG até 30 de julho de 2018



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Ajustamento do bloco principal com a correção normal-ortométrica

Para uma análise mais direta dos impactos da integração de informações gravimétricas aos desníveis da Rede Altimétrica de Alta Precisão, realizou-se um ajustamento similar ao relatado no tópico anterior. Mantiveram-se os mesmos dados de nivelamento, mas a substituição dos desníveis pelas diferenças de geopotencial foi eliminada. Em seu lugar, aplicou-se o mesmo procedimento dos ajustamentos anteriores da Rede: a correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais, por meio da equação denominada correção normal ortométrica (LUZ, 2008, p. 52):

$$\delta H^{\text{Nort}} \approx -2\alpha_1 H_m \Delta \varphi \sin(2\varphi_m) [1 + (\alpha_1 - 2\alpha_2/\alpha_1) \cos(2\varphi_m)] \quad (12)$$

sendo H_m a altitude média da seção; φ_m a latitude média da seção; e α_1 e α_2 os parâmetros da fórmula de Helmert para a gravidade normal, sendo considerados para o sistema geodésico de referência GRS80 (AJUSTAMENTO..., 2011) os seguintes valores:

$$\alpha_1 = 0,0053023655$$

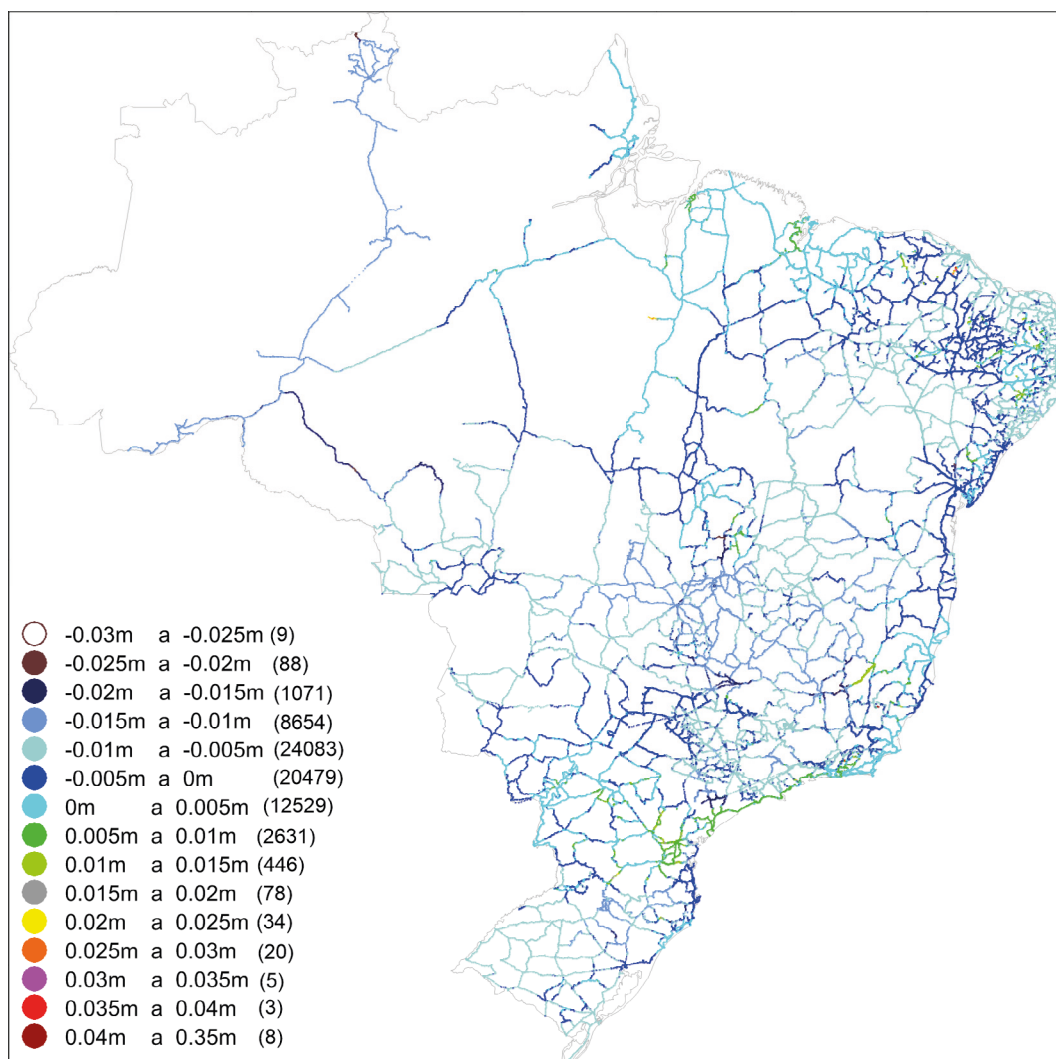
$$\alpha_2 = -0,0000059$$

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. Constatou-se que 94% das RRNN apresentam diferenças de +0,5 cm a -1,5 cm (Figura 20). Assim, é possível afirmar que os refinamentos decorrentes da depuração de inconsistências e da 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 Banco de Dados Geodésicos até 30 de julho de 2018.

Ajustamento das 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 desses trechos já haviam sido retirados nos ajustamentos anteriores, enquanto outros foram identificados nos processos de análise da Rede já descritos.

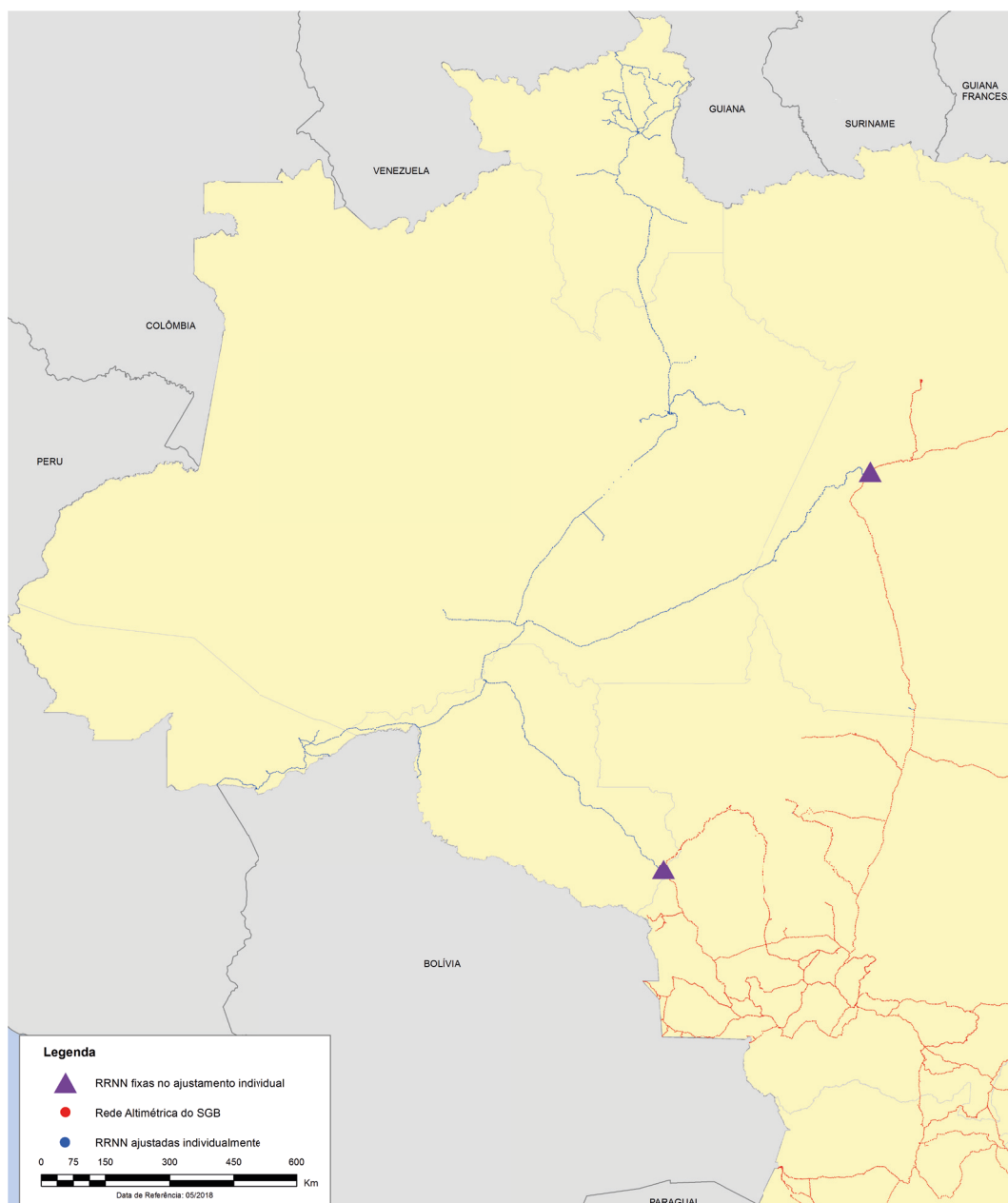
Figura 20 - Diferenças entre as altitudes normais do REALT 2018 e as altitudes ortométricas-normais calculadas com a mesma rede



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Devido à importância espacial de alguns trechos retirados durante a análise da Rede, aliada ao fato de que tais inconsistências no ajustamento individual do trecho não impactariam o usuário, optou-se por realizar o processamento individual de tais trechos. Dessa forma, evitaram-se eventuais impactos negativos de sua indisponibilidade no Banco de Dados Geodésicos. Esse 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 4 000 km e fechamento acima da tolerância, tendo sido rejeitado do ajustamento do bloco principal do REALT 2018. A retirada desse trecho, no entanto, acarretaria um vazio considerável na Rede Altimétrica da região; logo, tanto o grande circuito amazônico como os ramais a ele conectados (Humaitá-Venezuela, PortoVelho-Brasília) foram ajustados/calculados individualmente, considerando-se duas RRNN pertencentes à rede principal já ajustada como pontos de partida e chegada da linha. A Figura 21 ilustra esse exemplo, e o Apêndice mostra a situação completa da RAAP.

Figura 21 - Ajustamento individual do macrocircuito amazônico

Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Ajustamento da Rede Altimétrica do Amapá

Desde 2014, o IBGE vem desenvolvendo no Amapá, em parceria com o Governo do Estado, a revitalização do Sistema Geodésico Brasileiro, principalmente da Rede Altimétrica do Amapá. A construção e o nivelamento da nova Rede ocorreram em duas etapas. A primeira consistiu na materialização e medição de linhas pelas principais vias do estado, razão pela qual 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 nessa região. A Figura 22 ilustra a atual Rede Altimétrica do Amapá.

Figura 22 - Rede Altimétrica do Amapá



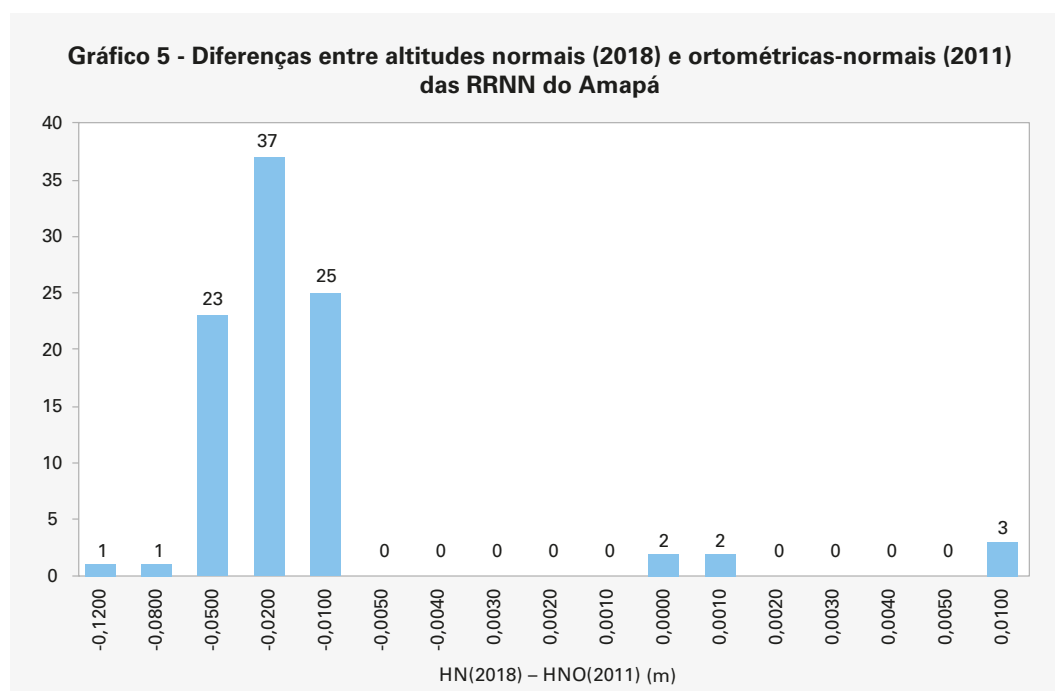
Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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 Altimétrica no 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.

Calculou-se o número geopotencial da RN 9329T (*Datum* de Santana) com base na metodologia apresentada no tópico **Cálculo dos números geopotenciais referentes aos Data de Imbituba e Santana**. Com os programas Monta_INTCOBS e INTCOBS_geopotencial, realizou-se 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-se nas observações apenas a correção normal-ortométrica, conforme equação (12).

Durante a implantação da Rede, verificou-se a realidade física das estações implantadas em 1980/1981. Foram encontradas em torno de 85 referências de nível em boas condições, que foram devidamente incorporadas à nova Rede. O Gráfico 5 ilustra as diferenças entre as novas altitudes normais e as vigentes no Banco até julho de 2018.



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Análise, crítica e liberação das informações descritivas

Um processo laborioso, mas de suma importância, consistiu na 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 disponibilizadas para o usuário por meio dos Relatórios de Estações Geodésicas (REG) são carregadas no Banco após crítica e análise minuciosa dos dados inseridos pelos técnicos de campo, logo após a realização de um levantamento ou de uma Verificação da Realidade Física - VRF.

Comentários finais e perspectivas

Como resultado principal dos processos componentes do REALT 2018 apresentados neste documento, foram disponibilizadas no Banco de Dados Geodésicos as **altitudes normais** das Referências de Nível que constituem a Rede Altimétrica de Alta Precisão. Como enfatizado anteriormente, esse tipo de altitude segue as recomendações internacionais sobre a definição da componente física do sistema de referência vertical para o Sistema de Referência Geocêntrico para las Américas - SIRGAS. Os cálculos e as análises desenvolvidos durante o reproprocessamento da Rede 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 Banco até 30 de 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. Tal 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 se mantêm relacionadas 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 desses referenciais locais e nacionais por sistemas definidos e realizados em âmbito global, estão sendo realizados estudos para a definição do chamado Sistema Internacional de Referência para

as Altitudes (International Height Reference System - IHRS) e a respectiva realização (materialização) global (International Height Reference Frame - IHRF). Inicialmente, estão sendo selecionadas estações de rastreamento 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 seis 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 Rede Altimétrica de Alta Precisão. As estações pré-selecionadas no Brasil foram: Imbituba (Santa Catarina), Presidente Prudente (São Paulo), Cuiabá (Mato Grosso), Marabá (Pará), Fortaleza (Ceará) e Brasília (Distrito Federal). Assim, vislumbra-se que a próxima realização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro, em alguns anos, já seja referida ao IHRS/IHRF.

Referências

AJUSTAMENTO simultâneo da rede altimétrica de alta precisão do sistema geodésico brasileiro: relatório. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. 62 p. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorioajustamento.pdf. Acesso em: jul. 2019.

ALTITUDES provisórias das RN instaladas pela Antiga Comissão da Carta Geral do Brasil e pelo Serviço Geográfico do Exército. *Anuário do Serviço Geográfico do Exército 1949*, Rio de Janeiro, 1950. Separata.

ALENCAR, J. C. M. de. Datum altimétrico brasileiro. *Cadernos de Geociências*, Rio de Janeiro: IBGE, n. 5, p. 69-73, jul. 1990. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/116/cgeo_1990_n5_jul.pdf. Acesso em: jul. 2019.

ALENCAR, J. C. M. de. *Sistema nacional de nivelamento de 1ª ordem*. Rio de Janeiro: IBGE, 1968. Trabalho apresentado na I Conferência Nacional de Geociências, realizada no Rio de Janeiro, em 1968. Disponível em: <https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/ate-1989/3138-sistema-nacional-de-nivelamento-de-1a-ordem-1968.html>. Acesso em: jul. 2019.

BEATTIE, D. S. *Program GHOST user documentation*. Ottawa: Geodetic Survey of Canada, 1987.

BOWIE, W; AVERS, H. G. *Fourth general adjustment of the precise level net in the United States and the resulting standard elevations*. Washington, DC: Department of Commerce, U.S. Coast and Geodetic Survey, 1914. 328 p. (Special publication, n. 18). Acima do título: Hypsometry. Disponível em: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.31822009761420&view=1up&seq=3>. Acesso em: jul. 2019.

ESPECIFICAÇÕES e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 56 p. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf. Acesso em: jul. 2019.

FEATHERSTONE, W. E. Prospects for the Australian height datum and geoid model. In: ÁDÁM, J.; SCHWARZ, K. (ed.). *Vistas for geodesy in the new millennium*. New York: Springer, 2002. p. 96-101. (International Association of Geodesy symposia, v. 125). Trabalho apresentado no IAG 2001 Scientific Assembly, realizado em Budapest, em 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/247287188_Prospects_for_the_Australian_Height_Datum_and_Geoid_Model. Acesso em: jul. 2019.

FORSBERG, R.; TSCHERNING, C. C. *An overview manual for the GRAVSOF Geodetic Gravity Field Modelling Programs*. 2nd. ed. [S.l.]: National Space Institute - DTU-Space, 2008. 75 p.

FREITAS, S. R. C. de; BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. *IGeS Bulletin*, Milan: International Service for the Geoid - ISG, n. 9, p. 47-62, June 1999. Special issue for South America. Disponível em: http://www.isgeoid.polimi.it/lges_bulletin/iges_bulletin.html. Acesso em: jul. 2019.

GUIMARAES, G. do N.; BLITZKOW, D. Problema de valor de contorno da Geodésia: uma abordagem conceitual. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba: Universidade Federal do Paraná - UFPR, v.17, n. 4, p. 607-624, out./dez. 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702011000400007&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: jul. 2019.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ H. *Physical Geodesy*. 2nd. corrected ed. Wien: Springer, c2006. 403 p.

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*, Heidelberg: Springer-Verlag, v. 38, n. 3, p. 549-570, May. 2017.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY EXECUTIVE COMMITTEE 2011-2015, 8., 2015, Prague. *IAG resolution n. 1 for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRs)*. München: IAG, 2015. 2 p. Disponível em: https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf. Acesso em: jul. 2019.

KRAKIWSKY, E. J.; MUELLER, I. I. *Systems of height*. Columbus: Ohio State University - OSU, 1965. 157 p. (Ohio State University. Department of Geodetic Science and Surveying, n. 60).

LUZ, R. T. *Estratégias para modernização da componente vertical do sistema geodésico brasileiro e sua integração ao SIRGAS*. 2008. 205 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal

do Paraná - UFPR, Curitiba, 2008. Disponível em: www.sirgas.org/fileadmin/docs/Roberto_Teixeira_Luz_Tese_de_Doutorado.pdf. Acesso em: jul. 2019.

MORITZ, H. *Advanced Physical Geodesy*. Karlsruhe: Wichmann; Tunbridge: Abacus, 1980. 500 p. (Sammlung Wichmann: Neue Folge: Buchreihe, 13).

NIVELAMENTO geral do estado: altitudes de precisão. *Boletim*, São Paulo: Instituto Geográfico e Geológico - IGG, n. 36, 1962. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/09/Boletim_IGG_36_Nivelamento_Geral_do_Estado_Altitudes_de_Precisao-1962.pdf. Acesso em: jul. 2019.

REUNIÓN DEL COMITÉ EJECUTIVO DE SIRGAS, 1., 2005, Caracas. *SIRGAS: sistema de referencia geocéntrico para las Américas: reporte 2005*. [S. l: s. n.], 2005. 37 p. Grupo de Trabalho III: Datum Vertical. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol09/23_Sanchez_ReporteGTIII.pdf. Acesso em: jul. 2019.

SIDERIS, M. G. Regional geoid determination. In: VANÍCEK, P.; CHRISTOU, N. T. (ed.). *Geoid and its geophysical interpretations*. Boca Raton: CRC Press, c1994. 343 p.

STEEVES, R. R. *Mathematical models for use in the readjustment of the North American geodetic networks*. [Ottawa: Energy, Mines and Resources Canada, 1984]. 33 p. (Geodetic Survey of Canada. Technical report, n. 1). Disponível em: http://www.bitwiseideas.com/uploads/4/4/0/2/44024515/math_models_1984.pdf. Acesso em: jul. 2019.

SUBIZA PIÑA, W. H.; SOUSA, M. A. de. O estado da base de dados gravimétricos do Observatório Nacional (BDG-ON), situação em junho, 2001. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo: Sociedade Brasileira de Geofísica, v.19, n. 3, p. 325-328, set./dez. 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v19n3/a08v19n3.pdf>. Acesso em: jul. 2019.

TALLER DEL SIRGAS-GTI, 2., 2008, Montevideo. *SIRGAS: sistema de referencia geocéntrico para las Américas: reporte 2007-2008*. [S. l: s. n.], 2008. 40 p. (Boletín informativo, n. 13). Grupo de Trabalho I: Sistema de Referência. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Boletin_SIRGAS_N0._13_Reporte_2007-2008.pdf. Acesso em: jul. 2019.

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

Apêndice

Ajustamento das linhas remanescentes do REALT-2018

Como discutido anteriormente, do bloco principal da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) foram excluídas as linhas com inconsistências cujas causas não puderam ser identificadas e corrigidas¹. Destas, as que tinham erros relativos até $12\text{mm.K}^{1/2}$ foram ajustadas separadamente, a fim de não contaminar o ajustamento do bloco principal. Grande parte desses ajustamentos teve seus resultados incluídos na primeira edição deste documento, disponibilizada, em 2018, apenas no portal do IBGE na Internet, mas algumas linhas foram concluídas após aquela divulgação, totalizando 1 876 Referências de Nível (RRNN). As linhas com erros relativos acima do mencionado limite, compostas por 1 070 RRNN, ainda se encontram em análise para solução das inconsistências. A Figura 1 apresenta a situação em junho de 2019.

A Figura 2 apresenta os resultados completos da comparação entre as altitudes do REALT 2018 e as do ajustamento anterior (2011), atualizando a situação mostrada, anteriormente, na Figura 18.

Na Figura 2, observa-se que foi sanada a descontinuidade nas diferenças de altitudes no grande ramal amazônico, ao sul de Manaus, mostrada na Figura 18. Essa descontinuidade teve origem na inconsistência detectada em 2009, quando trabalhos do IBGE para conexão da rede de nivelamento com levantamentos de gravimetria e dos Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS) identificaram um salto aproximado de 2 m nas diferenças entre as altitudes normais-ortométricas da RAAP (trecho 787B-788G) e as respectivas altitudes elipsoidais corrigidas com alturas geoidais do MapGeo2010.

¹ A esse respeito, consultar os tópicos **Fechamento e análise dos circuitos por meio das linhas internodais**, **Ajustamento da rede internodal** e **Ajustamentos preliminares, análise e correção das novas inconsistências** desta publicação.

Figura 1 - Rede Altimétrica do SGB após o REALT 2018

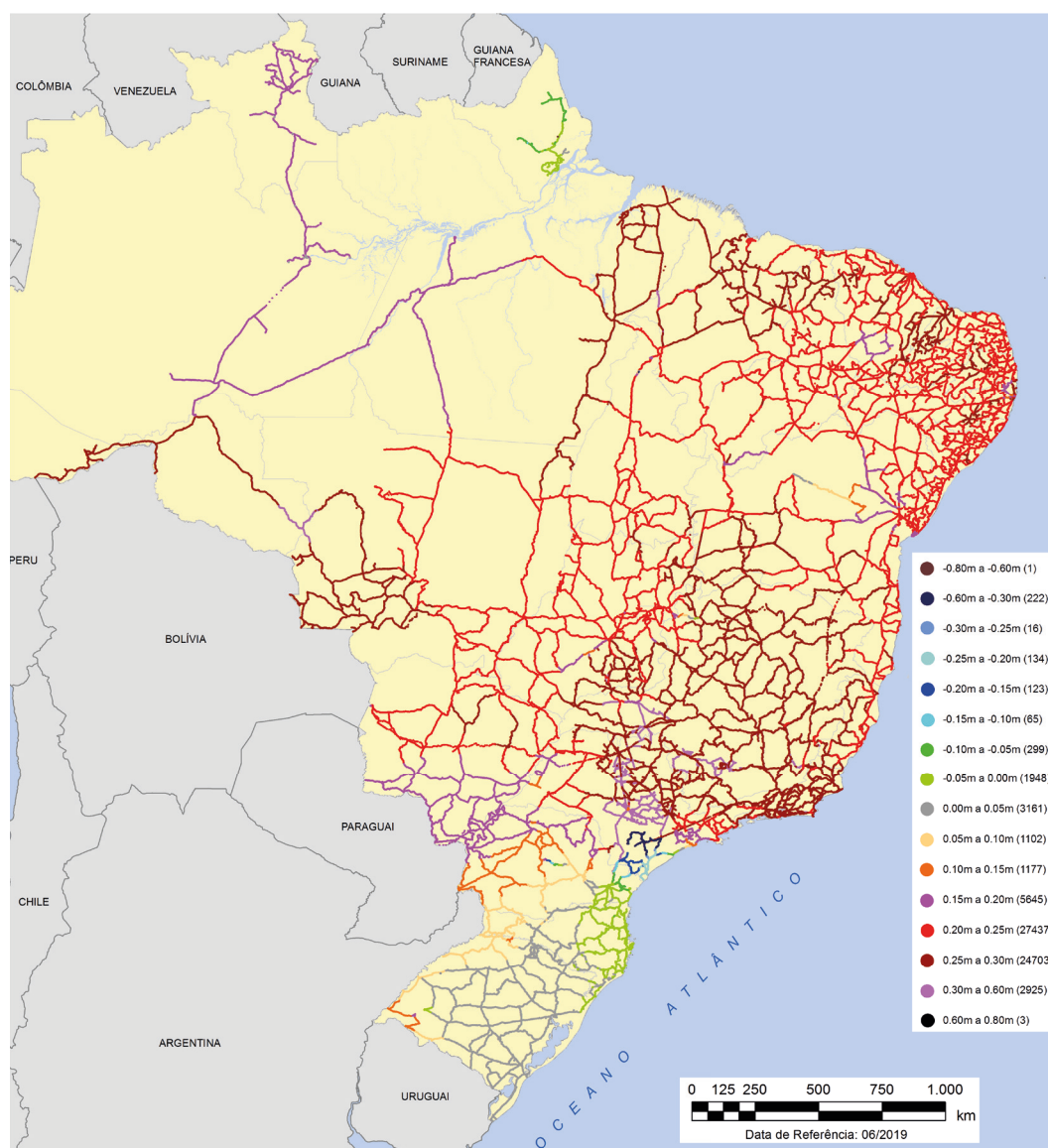


Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Nota: As RRNN disponíveis no Banco de Dados Geodésicos na divulgação do Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais - REALT 2018 são mostradas em vermelho; depois disso, em azul; e aquelas ainda não disponíveis, em verde.

Em função da impossibilidade de investigação da(s) causa(s) de tal problema antes da conclusão do ajustamento de 2011, decidiu-se atribuir o erro ao trecho de nivelamento de 80 km entre as mencionadas RRNN. Tal nivelamento foi, então, substituído pelo respectivo desnível elipsoidal, corrigido com o MapGeo2010. Esse procedimento não foi mencionado no respectivo documento (AJUSTAMENTO..., 2011), mas os relatórios do Banco de Dados Geodésicos para as RRNN afetadas incluíram uma advertência a esse respeito: "(*) Datum: A altitude da RN é oriunda de nivelamento geométrico cujo valor do desnível de partida deste trecho do ramal foi obtido através de levantamento GPS das estações SAT 92835 e 92837 (RN 787B e 788G, respectivamente) e reduzido com o MAPGEO2010".

Figura 2 - Diferenças entre as altitudes normais do REALT 2018 e as altitudes ortométricas-normais vigentes no Banco de Dados Geodésicos até 30 de julho de 2018, incluindo as linhas ajustadas separadamente do bloco principal da RAAP



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

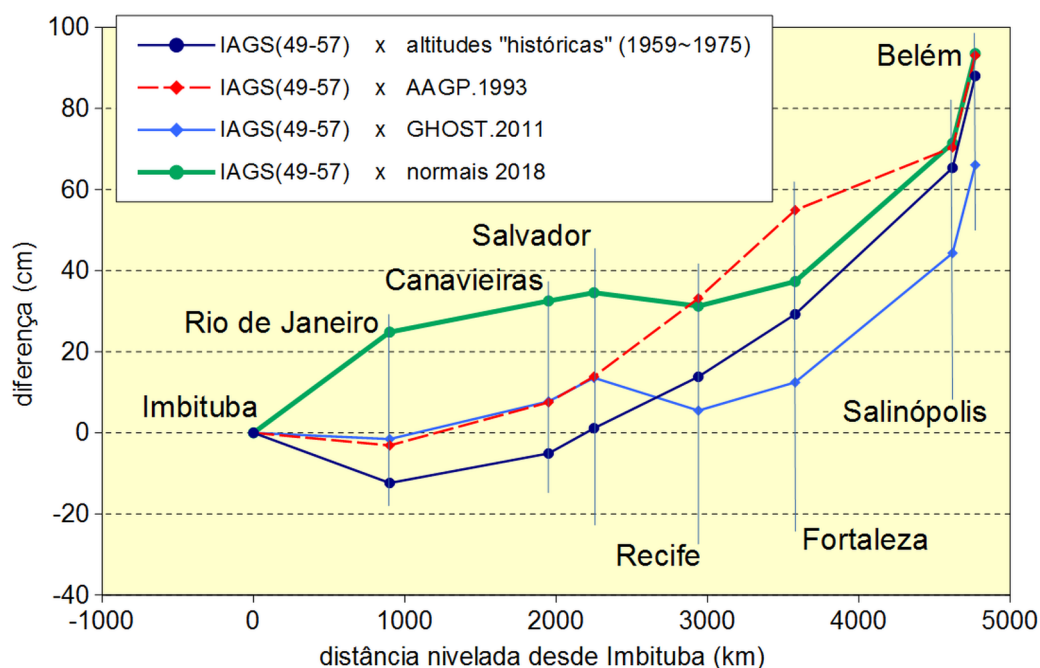
Posteriormente (2013), o IBGE logrou realizar o renivelamento do trecho afetado e, portanto, a correção da inconsistência. Em função da necessária aplicação do procedimento de verificação de abalo, o renivelamento foi mais extenso, feito no trecho entre as RRNN 786P e 788R, totalizando aproximadamente 130 km. Tais observações substituíram os desníveis originais, dos levantamentos de 1975, e as respectivas altitudes foram recalculadas e disponibilizadas no Banco, com data de referência de 19 de junho de 2015. Os novos desníveis apresentaram uma diferença aproximada de 5,4 cm em relação ao desnível elipsoidal corrigido com as ondulações do MapGeo2010.

Grande parte das RRNN intermediárias não foram localizadas no trecho renivelado. Assim, as RRNN não recalculadas foram inativadas no Banco e, conseqüentemente, nos cartogramas do presente documento, o trecho renivelado é representado com a rarefação decorrente de tal inativação.

Além da visualização da distribuição espacial das RRNN ainda não calculadas e das diferenças entre as novas altitudes normais e as altitudes normais-ortométricas anteriores, a avaliação dos resultados do REALT 2018 deve ser complementada com a comparação entre as altitudes da RAAP e as altitudes referidas ao nível médio do mar (NMM) local em cada estação maregráfica do Inter American Geodetic Survey - IAGS, conforme Alencar (1990). A Figura 3 mostra esse tipo de comparação para todos os ajustamentos da RAAP, observando-se que a maior diferença de tendência encontra-se entre Imbituba e Rio de Janeiro. Em todos os ajustamentos anteriores, as altitudes da RAAP indicavam que o nível médio do mar no Rio de Janeiro estaria abaixo do nível médio do mar em Imbituba, enquanto as novas altitudes normais indicam situação inversa. Tal inversão mostra maior consistência com a expansão térmica das águas tropicais e equatoriais prevista nos modelos globais de topografia oceânica e com os efeitos esperados da correção da gravidade real nas linhas que sobem a Serra do Mar no entorno de Imbituba, conforme análise da Figura 18 apresentada no tópico **Ajustamento das diferenças de número geopotencial do bloco principal**. Existem diferenças significativas de tendência também entre Salvador, Recife e Fortaleza; no entanto, a origem dessas variações parece residir nas diferentes estratégias de particionamento da RAAP aplicadas nos ajustamentos históricos (ALENCAR, 1968) e no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar, AAGP (LUZ, 2008, p. 122), em contraposição à ausência de particionamentos nos ajustamentos de 2011 e 2018.

Assim, a Figura 3 confirma a já mencionada consistência dos resultados do REALT 2018 em relação ao esperado significado físico das altitudes de referência do Sistema Geodésico Brasileiro.

Figura 3 - Diferenças entre as altitudes da RAAP e as altitudes referidas ao nível médio do mar em cada estação maregráfica operada pelo IAGS



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

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 Kronenberg Lima

Elaboração do Relatório

Jéssica Caroline dos Santos Siqueira

Maira Kronenberg Lima

Revisão do Relatório

Roberto Teixeira Luz

Suporte técnico-gerencial

Valéria Guimarães Carvalho (atualmente aposentada)

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 (atualmente lotado na UE-AP)

Aislan Célio Ferreira

Rogério Valério Pereira

Roberto Rainho Tavares

Aprovação do Relatório

Sônia Maria Alves Costa

Colaboradores externos

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Sílvio Rogério Correia de Freitas

Instituto Militar de Engenharia (IME)

Leonardo Castro de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Gabriel Guimarães

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Luiz Paulo Souto Fortes

Projeto Editorial

Centro de Documentação e Disseminação de Informações

Coordenação de Produção

Marisa Sigolo

Gerência de Editoração

Estruturação textual

Marisa Sigolo

Diagramação tabular e de gráficos

Aline Carneiro Damacena

Marisa Sigolo

Diagramação textual

Carlos Amaro Feliciano da Silva

Programação visual

Fernanda Jardim

Luiz Carlos Chagas Teixeira

Marisa Sigolo

Gerência de Documentação

Pesquisa e normalização documental

Ana Raquel Gomes da Silva

Fabiana do Nascimento Cortes Muniz (Estagiária)

Juliana da Silva Gomes

Lioara Mandoju

Nádia Bernuci dos Santos

Normalização textual e padronização de glossários

Ana Raquel Gomes da Silva

Elaboração de quartas capas

Ana Raquel Gomes da Silva

Gerência de Gráfica

Ednalva Maia do Monte

Newton Malta de Souza Marques

Impressão e acabamento

Helvio Rodrigues Soares Filho

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



/ibgecomunica



/ibgeoficial



/ibgeoficial



/ibgeoficial

www.ibge.gov.br 0800 721 8181

Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais

O estabelecimento da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro teve início em 1945, e, desde então, o IBGE recalcula periodicamente as altitudes de suas Referências de Nível (RRNN) por meio do tradicional ajustamento por mínimos quadrados. Esses cálculos incorporam novas observações de nivelamento geométrico e gravimetria, correção de inconsistências eventualmente detectadas e novas técnicas de observação e cálculo. Assim procedendo, o Instituto visa garantir a integridade, a consistência e a confiabilidade das informações divulgadas no seu Banco de Dados Geodésicos - BDG.

Nos ajustamentos anteriores, em virtude da insuficiência de observações gravimétricas, apenas a correção de gravidade teórica foi aplicada aos desníveis observados, daí resultando altitudes ortométricas simplificadas. No último ajustamento, REALT 2018, foi possível obter valores reais de gravidade para todas as RRNN da Rede e, assim, calcular as chamadas altitudes normais, mais adequadas aos modernos conceitos e métodos científicos e em consonância com o disposto pela Associação Internacional de Geodésia (International Association of Geodesy - IAG) com vistas à definição do chamado Sistema Internacional de Referência para Altitudes (International Height Reference System - IHRF) e sua respectiva realização (materialização) global (International Height Reference Frame - IHRF).

Nesta publicação, o IBGE descreve a metodologia desenvolvida para uma completa revisão da rede de circuitos e incorporação da informação gravimétrica aos desníveis nivelados, apresenta os resultados referentes ao reajustamento da Rede Altimétrica de Alta Precisão, em termos de seus números geopotenciais, e traz uma análise comparativa das novas altitudes normais em relação aos ajustamentos anteriores. Nesta nova edição do documento, que atualiza a versão disponibilizada apenas na Internet, em 2018, a análise dos resultados é complementada com a inclusão das informações maregráficas históricas no litoral brasileiro e com o detalhamento das linhas ajustadas individualmente.

A reformulação dos procedimentos de análise e tratamento das informações culmina com o cálculo e a divulgação, no portal do IBGE na Internet, das mais rigorosas altitudes da Rede, consistentes com os modelos geodésicos globais. Para tal, cumpre destacar, foi decisivo o grande aprimoramento da cobertura gravimétrica do Território Nacional, conduzido pelo IBGE e por outras instituições nas últimas décadas.

A publicação também está disponível no referido portal.

