
AJUSTAMENTO SIMULTÂNEO DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO (RAAP) DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO (SGB)

NÍVIA RÉGIS DI MAIO PEREIRA¹
CLAUDIA CRISTINA CUNHA SANTOS DA SILVA¹
DANIEL GOLDANI¹
RENATO RODRIGUES PINHEIRO¹
WALTER HUMBERTO SUBIZA PINA²

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Diretoria de Geociências - DGC
Coordenação de Geodésia - CGED¹
Coordenação de Cartografia - CCAR²

nivia.maio, {claudia.santos, daniel.goldani, renato.rodrigues, humberto.pina}@ibge.gov.br

RESUMO - O último ajustamento global da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), ocorreu no início da década de 90. Passados mais de 10 anos, novas observações foram inseridas na rede, provenientes de nivelamentos geométricos. Por esse motivo, já se justificaria um novo ajustamento das observações. Outro fato importante é que esse último ajustamento não aconteceu de forma simultânea, ou seja, com todas as estações da rede, o que impossibilitou a disponibilidade do desvio-padrão das altitudes. Entre 1945 e 1991, foram realizados nove ajustamentos parciais da RAAP. Em 1991 realizou-se uma nova divisão da rede, desta vez em forma de macrocircuitos, com a finalidade de evitar distorções excessivas. Essa divisão resultou no Ajustamento Altimétrico Global Preliminar – AAGP. Em 2005, o Projeto de Densificação Altimétrica (DALTI) do SGB iniciou um novo ajustamento da RAAP, desta vez simultâneo. Para tanto, foi utilizado o sistema *GHOST – Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial Date*. Foram disponibilizadas aproximadamente 69.000 estações com altitudes ajustadas e o seu respectivo desvio-padrão. É importante ressaltar que tanto a introdução de novas observações, como a metodologia usada ocasionaram mudanças nas altitudes das antigas estações. Este trabalho tem como objetivo apresentar o ajustamento da RAAP em GHOST e seus resultados finais.

ABSTRACT - The latest global adjustment of the Altimetric Network of High Precision (ANHP) of Brazilian Geodetic System (SGB) was done in the beginning of the 1990s. More than 10 years after that, new observations were inserted in the network, coming from geometric leveling. These reasons justify a new adjustment of observations. Another important fact to be mentioned is that this last adjustment did not happen in a simultaneous way, which means it did not involve all the network stations. For this reason, it was impossible to provide their individual standard deviation of heights. From 1945 to 1975, eight partial adjustments of the ANHP were done. In 1991, another network division was done, this time in the form of big loopings, in order to avoid excessive distortions. This last division resulted in the Preliminary Global Vertical Adjustment - PGVA. In 2005, the Project of Vertical Network Densification – DALTI of the SGB, started a new adjustment of the ANHP, this time in a simultaneous way. Towards this goal, *GHOST – Geodetic Adjustment using Helmet blocking Of Space and Terrestrial Date* was used. Nearly 69000 stations were provided adjusted heights and the respective standard deviation. It is important to point out that due to the inclusion of new observations and to the methodology that was used, caused changes in the heights of old stations. The purpose of this work is to present the HPVN adjustment in GHOST and the final results.

1 INTRODUÇÃO

Como os demais tipos de coordenadas geodésicas, as altitudes ortométricas das Referências de Nível (RRNN) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) são periodicamente recalculadas, em função da incorporação de novas observações, correção de inconsistências e utilização de novas técnicas de observação e cálculo. Este é o caso do ajustamento ora apresentado, resultado do esforço de seis anos da equipe do Projeto Densificação Altimétrica (DALTI) da Coordenação de Geodésia (CGED) da Diretoria de Geociências (DGC) do IBGE.

Desde o início da década de 1990, as observações da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do SGB não passavam por um processo de reajustamento. Além disso, o último cálculo denominado Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (AAGP), foi realizado de forma particionada, isto é, a Rede Altimétrica foi dividida em vários macrocircuitos (MMCC) ajustados independentemente. Todos esses fatos justificaram a decisão de, em 2005, iniciar um novo reajustamento, mas, desta vez, de forma simultânea, isto é, com todos os dados processados em um único sistema de equações. Para tanto, foi utilizado o software canadense denominado GHOST (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data*), que permite o ajustamento simultâneo de grandes redes geodésicas.

O processo de organização e preparação de todos os dados da RAAP, tanto de observações quanto de memorial descritivo, demandou o desenvolvimento de programas computacionais específicos para crítica dos dados, por meio dos quais foram identificadas e corrigidas diversas inconsistências.

Neste artigo, são descritos os procedimentos e conclusões do Ajustamento. Informações mais detalhadas podem ser encontradas no Relatório do Ajustamento da RAAP (IBGE, 2011), através do [link ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatorioajustamento.pdf).

2. HISTÓRICO DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO DO SGB

Apresenta-se um resumo das informações mais relevantes para a contextualização do novo ajustamento.

2.1 Medições

Em outubro de 1945, iniciaram-se os levantamentos por Nivelamento Geométrico de Alta Precisão do IBGE, realizados pela Seção de Nivelamento (SNi) da Divisão de Cartografia (DC) e culminando no surgimento da Rede Altimétrica do SGB, onde, no município de Urussanga, Santa Catarina, localiza-se a Referência de Nível RN 1 A (Alencar, 1968).

Em dezembro de 1946, a Rede Altimétrica foi conectada à Estação Maregráfica de Torres, no Rio Grande do Sul, permitindo, então, o cálculo das altitudes das RRNN já implantadas, dotando o Brasil de uma estrutura altimétrica fundamental destinada ao apoio de mapeamento e suporte às grandes obras de engenharia, tais como barragens, pontes, viadutos, rodovias, saneamento básico etc.

Em 1958, quando a Rede Altimétrica contava com aproximadamente 30.000 km de linhas de nivelamento, houve a substituição do Datum Torres pelo Datum Imbituba, definido pela Estação Maregráfica de Imbituba, localizada no município de mesmo nome, no estado de Santa Catarina. Tal substituição implicou na definição mais consistente do nível médio do mar como origem das altitudes da Rede Altimétrica, pois o marégrafo de Imbituba contava com nove anos de observações de variação do nível do mar, enquanto que Torres contava apenas com um ano de observações (Alencar, 1990). Grande parte da Rede Altimétrica está conectada ao *Datum* Imbituba mas, devido à impossibilidade de estabelecimento de RRNN no entorno do baixo Rio Amazonas, a pequena porção da Rede Altimétrica existente no estado do Amapá (Figura 01) não pôde ser conectada a Imbituba, levando à utilização do nível médio do mar no Porto de Santana entre 1957 e 1958, originando o *Datum* Santana (Luz, Guimarães, 2001).



Figura 01: Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro

2.2 Ajustamentos anteriores da Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP

Entre os anos de 1945 e 1975, foram realizados oito ajustamentos da RAAP (1948, 1952, 1959, 1962, 1963, 1966, 1970, e 1975, Figura 02), sendo que apenas os três primeiros consideraram simultaneamente todas as estações da rede (Alencar, 1968). A partir do 4º ajustamento, devido à grande quantidade de dados, foram ajustados apenas os blocos constituídos pelas linhas novas, à época, tomando como referência as estações cujas altitudes haviam sido calculadas nos blocos anteriores, caracterizando o conjunto como um ajustamento particionado.

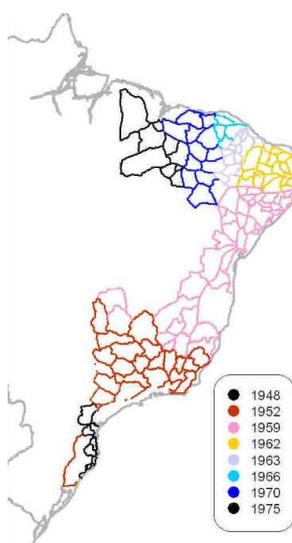


Figura 02: Evolução dos ajustamentos de 1948 até 1975 (Luz et al., 2002)

Em 1988, iniciou-se um reajustamento com nova divisão da rede, desta vez em forma de sub-redes de MMCC formados por linhas principais e internas (Figura 03), de acordo com as seguintes etapas (IBGE, 1991):

- Crítica da rede com análise de fechamentos de circuitos e linhas de nivelamento;
- Estudo de viabilidade de aplicação de correções aos erros sistemáticos (correção ortométrica, correção astronômica e correção de refração atmosférica);
- Geração de um conjunto homogêneo de altitudes ajustadas de referências de nível;
- Identificação de áreas problemáticas; e
- Avaliação geral dos circuitos de nivelamento com montagem de “croquis”.

A finalidade da nova divisão da rede era, basicamente, evitar que a propagação de erros causasse distorções excessivas na rede, além de contornar as limitações do programa computacional utilizado para o ajustamento, na época.

A data de referência de cálculo do AAGP no BDG é 01/12/1992, totalizando, aproximadamente, 43079 RRNN. Desde então, somente foram realizados ajustamentos de linhas, oriundas de medições posteriores ao AAGP ou nele não incluídas por motivos diversos e incorporação das altitudes de RRNN provenientes de ramais (linhas de nivelamento que não formam circuito, cujos desníveis não podem ser ajustados), totalizando 11527 RRNN até 2004, reforçando a justificativa para um novo ajustamento da Rede.

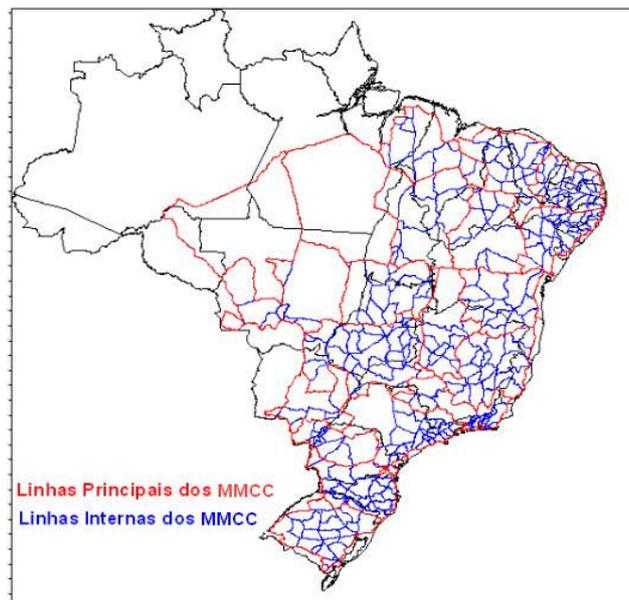


Figura 03: linhas principais e internas dos MMCC

3. DADOS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

3.1 Dados primários

Arquivos de Dados Primários são aqueles compostos por informações de nivelamento (derivadas do tratamento das cadernetas de anotação das leituras oriundas de levantamentos de campo, realizados pelo método clássico de nivelamento geométrico de alta precisão), pelas datas do levantamento e as distâncias das seções niveladas em km.

3.2 Coordenadas planimétricas

Até meados da década de 1990, as coordenadas planimétricas de algumas RRNN eram obtidas de cartas topográficas, principalmente, nas escalas 1:50.000 e 1:100.000, algumas RRNN a partir de cartas com escalas menores e outras através de interpolação.

A partir de meados da década de 1990, as coordenadas das RRNN implantadas ou visitadas passaram a ser determinadas com navegadores GPS, aprimorando significativamente sua precisão.

3.3 Descritivos das RRNN

O relatório das estações geodésicas, disponibilizado na página do IBGE na internet a partir do conteúdo do BDG, contém, além das coordenadas, o memorial descritivo, isto é, data da última visita, localização, descrição, foto, estado de conservação, datas de medição e de cálculo, conexão com outras estações geodésicas etc.

3.4 Sistemas GHOST

O sistema *GHOST* (*Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data*) consiste de uma série de programas computacionais desenvolvidos pela *Geodetic Survey Division (GSD)* do *Natural Resources Canada (NRCan)*, com a finalidade de ajustar redes geodésicas tridimensionais (Beattie, 1987). O modelo matemático permite a combinação de observações geodésicas clássicas, como direções, distâncias, azimutes e diferenças de nível, assim como as observações por meio das tecnologias por satélites (Steeves, 1983).

O sistema *GHOST* possibilita o ajustamento de redes geodésicas através de dois métodos diferentes:

- **Método padrão:** para redes de porte médio e menores, até, aproximadamente, 15000 observações;
- **Divisão por blocos de Helmert:** para grandes redes, como, por exemplo, o ajustamento com todas as observações da RAAP.

As bases conceituais do método de *Helmert Blocking* foram desenvolvidas por Helmert no final do século XIX, porém sua aplicação prática tornou-se viável somente após a expansão e consolidação do uso científico de computadores, na década de 1970 (Beattie, 1987). A técnica consiste em dividir o ajustamento de grande escala em vários blocos menores, evitando grandes esforços computacionais para a manipulação, transferência e armazenamento de sistemas matriciais superdimensionados.

4. ETAPAS DO TRABALHO

As atividades desenvolvidas no âmbito do novo ajustamento da RAAP com o sistema *GHOST* podem ser divididas em três etapas:

1ª Ajustamento das linhas principais e internas utilizando a mesma divisão de MMCC realizada no AAGP, para avaliação e validação da metodologia. Essa etapa ocorreu de 2005 até o primeiro semestre de 2007, onde foi fixada a estação 4X e outorgando aos desníveis valores de desvio padrão *a priori* proporcionais às respectivas distâncias niveladas. Os resultados do ajustamento coincidiram com o ajustamento similar efetuado no AAGP. Os valores das altitudes ajustadas tiveram praticamente a mesma magnitude, o que permitiu a validação da metodologia. O desvio padrão variou entre 1 e 13 cm, correspondendo, estes últimos valores extremos, às estações com distâncias de aproximadamente 3000 km da estação de referência 4X, localizadas ao norte e oeste do país.

2ª Ajustamento simultâneo da RAAP, fixando as estações 4X (origem do Datum Imbituba) e 9329T (origem do Datum Santana). Essa etapa se estendeu de julho de 2007 até o primeiro trimestre de 2010, com a realização de atividades desde a busca, organização e crítica dos dados, análise temporal da rede até a formatação dos arquivos para entrada no *GHOST* e a realização do ajustamento da rede propriamente.

O processo de validação dos dados primários (linhas de nivelamento e coordenadas planimétricas), realizado nesta etapa, identificou e tratou inconsistências tais como: Códigos de estações fora do padrão de referência de nível do IBGE; ausência ou troca de código do tipo de nivelamento (linha, ramal, etc.); ausência de leitura (nivelamento - N e/ou contranivelamento - CN); leituras inconsistentes com diferenças acima da tolerância entre os desníveis (N-CN); inconsistência entre as distâncias niveladas e calculadas a partir das coordenadas planimétricas das respectivas RRNN (ver exemplo na próxima seção). Paralelo a isso, também foi desenvolvido um trabalho de validação dos descritivos das estações.

Ressalta-se, ainda, a importância do produto final dessa etapa não ser “apenas” arquivos processados para o ajustamento, mas também, uma massa de dados altamente organizada e criticada que servirá de base para a realização futura do ajustamento das diferenças de geopotencial da Rede Altimétrica (desníveis com gravidade observada), visando à modernização do sistema vertical brasileiro, além de vários outros estudos científicos, tais como a preparação das informações das estações de conexão SIRGAS.

Ainda nesta etapa as altitudes ajustadas foram comparadas com 46705 RRNN, classificadas como Ajustada - Alta Precisão no BDG, onde 15% apresentaram diferenças acima de 20 cm e apenas 0,1% (46 estações) estavam acima de 50 cm.

3ª Ajustamento final da RAAP, com correções de inconsistências encontradas nas etapas anteriores, tendo sido necessário, em alguns casos, realizar campanhas de verificação em campo utilizando as metodologias de nivelamento geométrico e medições com GPS. Além disso, foram incluídas observações de novas linhas até outubro de 2010, também passando pelos processos de crítica dos dados. Também foi realizada a comparação com as altitudes antigas que constavam no BDG em 2011.

5. RESULTADOS FINAIS

Para a análise dos resultados finais, foi seguida a metodologia e os procedimentos apresentados por Steeves e Fraser (1987). Porém, ressalta-se que esse ajustamento tem algumas limitações, já sinalizadas, dentre as quais as mais importantes são: a sua dependência em apenas duas estações fixas, a ausência de injunções, a falta de redundância nas observações, característica do tipo de levantamento realizado e, principalmente, a aceitação de observações com qualidade regular no intuito de não perder vinculações ou consistência na rede. Com estes esclarecimentos, a análise foi realizada de uma maneira clássica em ajustamento de observações. Os arquivos de entrada do ajustamento configuravam uma rede com as seguintes características, conforme Quadro 01:

Estações de ajustamento	69616
Estações fixas	2
Desníveis observados	74193
Graus de liberdade do ajuste	4580

Quadro 01: Estatísticas do desvio padrão ajustado

5.1 Análises do desvio padrão das altitudes ajustadas e dos resíduos dos desniveis entre as estações

O desvio padrão das altitudes ajustadas variou entre alguns mm e 0,24 m como mostra o Quadro 02.

Média	0,080
Mín.	0,001
Máx.	0,242

Quadro 02: Estatísticas do desvio padrão ajustado

O Gráfico 01 mostra a distribuição do desvio padrão, separado por classes de 25 mm, salientando que a maioria das estações encontra-se no intervalo de até 10 cm e os maiores valores do desvio padrão, correspondem a estações afastadas das estações origens da rede.

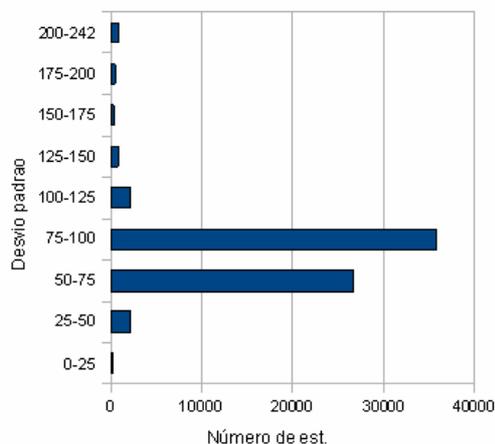


Gráfico 01: Distribuição do Desvio Padrão (mm)

A Figura 04 mostra a espacialização dos desvios padrões das estações ajustadas.

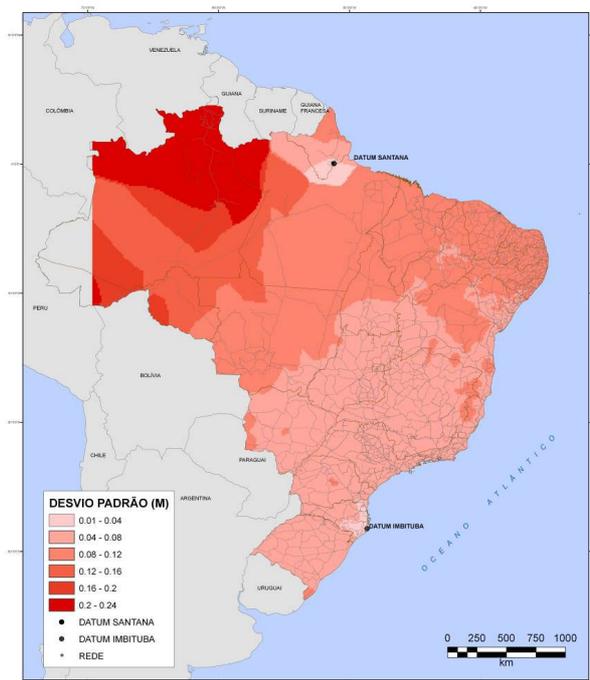


Figura 04: Distribuição do Desvio Padrão

Os resíduos dos desníveis entre estações foram analisados, assim como o seu desvio padrão antes e depois do ajustamento, como mostram a Tabela 03 e o Gráfico 02.

Tabela 03: Estatísticas dos resíduos (mm)

	Resíduo	DP <i>a priori</i>	DP <i>a post.</i>
Média	0,01	5,57	6,45
Mín.	-23,80	0,30	0,22
Máx	30,35	30,00	29,05

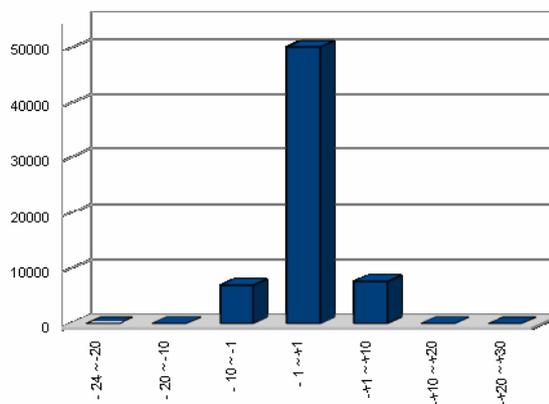


Gráfico 02: Distribuição dos resíduos (mm)

Praticamente toda a rede, 99,7%, está com os resíduos dos desníveis entre as estações no entorno de ± 10 mm, sendo que 98% apresentam resíduos entorno de ± 5 mm, dentro dos padrões exigidos para levantamentos de alta precisão (Tolerância de “3 mm Raiz Km” e Distância máxima de “3 Km”).

5.2 COMPARAÇÃO DAS ALTITUDES BDG 2011 X *GHOST* 2011

Os resultados do ajustamento simultâneo e completo da Rede Altimétrica, utilizando o sistema *GHOST* em maio de 2011 foram comparados com os valores das altitudes das RRNN que constavam no BDG também em maio de 2011.

Essa comparação foi realizada em relação à classificação das altitudes das estações no BDG como Ajustada - Alta Precisão.

Em maio de 2011 havia 47127 RRNN classificadas como Ajustada - Alta Precisão no BDG, dentre as quais, aproximadamente 50% das altitudes apresentaram diferenças em relação ao ajustamento no *GHOST* de até 10 cm.

A Figura 05 apresenta a espacialização das RRNN com diferenças nas altitudes, distribuídas nas seguintes classes: até 5 cm, de 5 a 10 cm, de 10 a 20 cm, de 20 a 30 cm, de 30 a 40 cm e acima de 40 cm.

Apenas 3% das estações apresentaram diferenças superiores a 40 cm e a diferença máxima encontrada foi de 71cm.

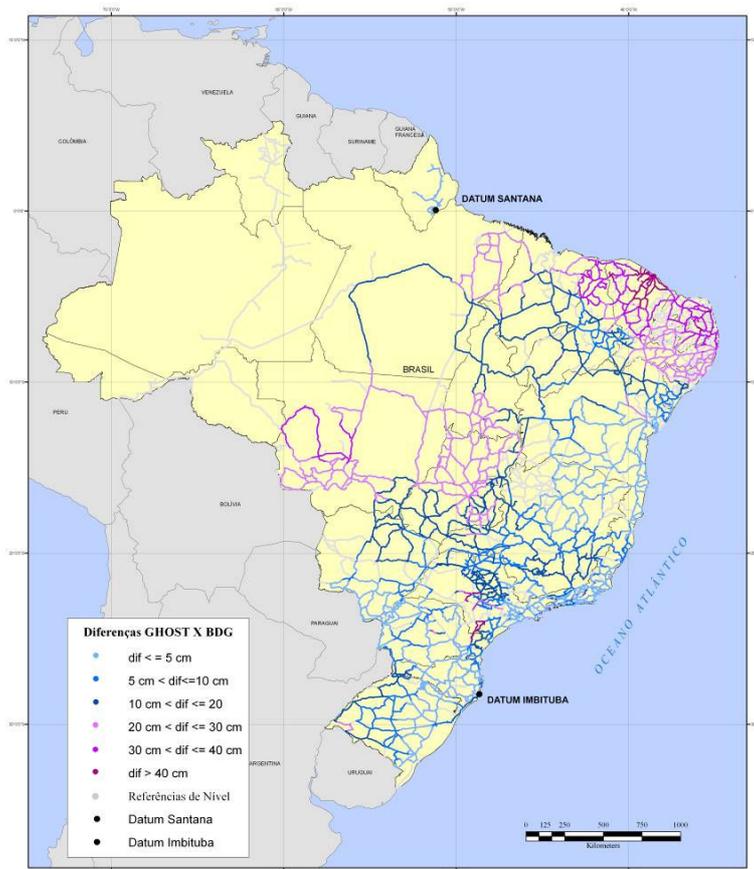


Figura 05: Espacialização das RRNN com diferenças nas altitudes

6. CONCLUSÕES

Realizou-se no IBGE o ajustamento da Rede Altimétrica do SGB com todas as informações calculadas simultaneamente.

Esse ajustamento apresentou algumas limitações, das quais as mais importantes são: a dependência em apenas duas estações fixas (uma no Datum Santana e outra no Datum Imbituba), ausência de injunções, falta de redundância nas observações, ou seja, o grau de liberdade da rede é muito pequeno em relação à quantidade de observações, dificultando a análise dos resultados; e a aceitação de observações com baixa qualidade (ainda existem algumas poucas seções com resíduos entre 2 e 3 cm) no intuito de não perder vinculações ou consistência na rede. Além disso, algumas seções foram desconsideradas do ajustamento por apresentarem problemas nos desníveis, sendo necessária a sua remedição. Os respectivos valores das altitudes dessas estações com inconsistências foram desativados do Banco de

Dados Geodésicos. Além disso, as RRNN provenientes de ramais (linhas abertas, sem fechamento de circuito), serão disponibilizadas no BDG com um texto explicativo e sem o valor do desvio padrão da altitude.

Os resultados finais concordam com os desvios padrão estimados *a priori* de 2,5 mm/ \sqrt{k} nos desníveis ajustados e desvios padrão máximo de 24 cm nas altitudes obtidas. As diferenças entre as altitudes que estão no BDG, classificadas como Ajustada Alta Precisão, e as determinadas no ajustamento foram de, no máximo, 71 cm, sendo que em 70% das RRNN essa diferença não ultrapassa 20 cm.

Outro fato importante é a geometria da Rede Altimétrica na Região Amazônica, que é prejudicada pela falta de alternativas para estabelecimento de circuitos. Com isso, as grandes linhas envolvidas são mais vulneráveis à incidência de problemas não detectáveis pelos controles de qualidade usuais. Assim, recomenda-se a adoção de cuidados adicionais em trabalhos nessa região, tais como a utilização de um número maior de RRNN para validação dos respectivos desníveis (renivelamento).

Este trabalho pode ser entendido como base para a modernização da RAAP, evidenciando que a mesma ainda carece de significado físico e, portanto, como ação futura, é previsto o planejamento para viabilização do ajustamento da rede com gravidade para fins de cálculo dos números geopotenciais.

REFERÊNCIAS

Alencar, J. C. M. 1968. Sistema Nacional de Nivelamento de 1ª Ordem. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br / canal_artigos](http://www.ibge.gov.br/canal_artigos)>.

Alencar, J. C. M. 1990. Datum Altimétrico Brasileiro. Disponível em: <[http:// www.ibge.gov.br/ canal_artigos](http://www.ibge.gov.br/canal_artigos)>.

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

IBGE, 1991. Relatório Técnico nº1: Resultados preliminares do ajustamento global da Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 31 páginas.

Luz, R. T.; Guimarães, V. M. 2001. Realidade e Perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. Disponível em: <[http:// www.ibge.gov.br / canal_artigos](http://www.ibge.gov.br/canal_artigos)>.

IBGE, 2011. Relatório Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro, <<ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/RelatorioAjustamento.pdf>>.

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

Steeves, R. R., Fraser, C. S. 1987. Statistical Post-Analysis of Least Squares Adjustment Results. Papers for the CISM Adjustment and Analysis Seminars, Canadian Institute of Geomatics, Krakiwsky, E.J., editor.