



RESULTADOS PRELIMINARES DO AJUSTAMENTO GLOBAL DA REDE ALTIMÉTRICA DE ALTA PRECISÃO DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO

Gilberto Pessanha Ribeiro

Roberto Teixeira Luz

Departamento de Geodésia – DGC – IBGE

Av. Brasil, 15671 – Parada de Lucas

Rio de Janeiro – RJ – CEP 21.241

Brasil

RESUMO

São apresentados e discutidos a metodologia e os primeiros resultados do Ajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão de Sistema Geodésico Brasileiro, visando informar à comunidade geodésica usuária desses dados, sobre a procedência e características dos mesmos. Ao final, são relacionadas algumas atividades de refinamento e complementação do tratamento desta rede.

ABSTRACT

The methodology and the first results of Global Adjustment of the High Precision Levelling Network of Brazilian Geodetic System are presented in order to inform to the geodetic user community of this data, its origin and characteristics. Finally, some activities related to the refinement and treatment completion of the network are listed.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é informar sobre a procedência do novo conjunto de altitudes ajustadas das referências de nível do Sistema Geodésico Brasileiro que, a partir de maio de 1991, já se encontram disponíveis no IBGE para divulgação.

Neste trabalho são apresentados comentários relativos aos ajustamentos executados com os dados (desníveis médios observados das seções) de nivelamento geométrico de alta precisão, segundo uma metodologia particular adotada pelo Departamento de Geodésia.

A partir de análises e estudos de alternativas para o ajustamento de desníveis da rede correspondendo a, aproximadamente, 50.000 referências de nível, foi adotada uma



metodologia especial (*Ribeiro; Luz & Lobianco, 1989*) para a subdivisão dessa rede em unidades menores de trabalho. A partir dessa subdivisão, os dados foram criticados e preparados através de programas computacionais específicos.

2. BREVE HISTÓRICO

Desde 1945 o IBGE realiza levantamentos de campo referentes a atividades de nivelamento geométrico de alta precisão. Nesse período foram empregadas diferentes metodologias e instrumentais, resultando, sob este aspecto, em dados heterogêneos.

No período de 1948 a 1975, foram executados, manualmente, ajustamentos em blocos da rede altimétrica, partindo do sul do país, através do método das equações de condição (método dos correlatos), envolvendo, no final do oitavo ajustamento, um total de, aproximadamente, 420 desníveis nó a nó. Foram incluídas algumas linhas de nivelamento levantadas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (D.S.G.), pelo Serviço Aerofotogramétrico Cruzeiro do Sul (S.A.C.S.) e pelo Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo (I.G.G.S.P.) (*Alencar, 1976*). A partir desses ajustamentos, foram efetuados outros, envolvendo os desníveis seção a seção das linhas sendo também geradas altitudes das referências de nível dos ramais de nivelamento. Foi adotado um procedimento rigoroso na seleção dos dados e nos ajustamentos seqüenciais executados, mas não havia as facilidades que hoje há, no que diz respeito ao processo informatizado de armazenagem e tratamento dos dados.

As atividades necessárias a esse processo de informatização foram desenvolvidas ao longo da década de 80, culminando com o início do Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (A.A.G.P.) de que trata este trabalho. Nessa época, já se fazia necessário um ajustamento global, em face do volume considerável de novas observações a serem inseridas no processo de cálculo de ajustamento. Para tal ajustamento global, foram caracterizados os seguintes objetivos iniciais:

- 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 com o emprego de um método eficiente de ajustamento;
- identificação de áreas problemáticas; e
- avaliação geral dos circuitos de nivelamento com montagem de “croquis”.

3. CRÍTICA TÉCNICA E FORMAL DAS OBSERVAÇÕES

3.1. Introdução

Para o ajustamento da rede altimétrica de alta precisão, são requeridos cuidados especiais na crítica e análise dos dados derivados de nivelamento geométrico: desníveis médios observados e comprimentos de linhas, obtidos a partir do nivelamento e do contranivelamento de seções de nivelamento. Os arquivos de dados derivados das cadernetas de campo são gerados manualmente, o que torna imperativa uma crítica, tanto técnica quanto formal, desses dados.

A crítica técnica de linhas de nivelamento está associada à análise de fechamentos de linhas com base nas especificações pré-estabelecidas (*IBGE, 1983*) e a crítica formal está relacionada com a detecção de erros grosseiros na preparação dos dados. Essas críticas são feitas por um programa computacional específico (*Ribeiro; Luz & Lobianco, 1989*).

3.2. Seleção de Linhas de Nivelamento

Conforme citado anteriormente, os dados selecionados para os ajustamentos iniciais foram dispostos graficamente, através de “croquis” que refletiam a geometria da rede, a qual, como já mencionado, foi dividida em unidades menores de trabalho,



denominadas macrocircuitos. Os macrocircuitos apresentaram, em sua configuração final, os erros de fechamento e precisões mostrados na tabela 1.

TABELA 1
ERROS DE FECHAMENTO E PRECISÕES
DOS MACROCIRCUITOS

MACRO CIRCUITO	ERRO DE FECHAMENTO (metros)	PERÍMETRO (km)	PRECISÃO (mm / \sqrt{km})	NÚMERO DE DESNÍVEIS AJUSTADOS NÓ A NÓ	NÚMERO DE DESNÍVEIS REJEITADOS NÓ A NÓ
01	0,0469	2662,20	0,9	56	2
02	0,1880	2821,50	3,5	77	2
03	0,2056	2193,89	4,4	24	1
04	0,1694	3797,89	2,8	40	4
05	0,0518	4662,30	0,8	17	5
06	- 0,2296	3084,35	4,1	12	0
07	- 0,1700	3531,44	2,9	10	3
08	- 0,0547	2849,36	1,0	56	7
09	0,1519	2760,38	2,9	23	1
10	0,2418	4664,17	3,5	20	1
11	0,1917	3034,64	3,5	14	2
12	0,0144	4195,21	0,2	17	5
13	- 0,0223	3508,94	0,4	-	-
14	0,0793	3372,16	1,4	16	1
15	0,0199	2811,13	0,4	15	0
16	- 0,0346	2704,09	0,7	54	1
17	- 0,1658	2127,24	3,6	51	2
18	0,0748	3193,76	1,3	41	8
19	- 0,1321	2886,93	2,5	19	0
TOTAIS				619	47

Essa configuração final foi estabelecida com base na tolerância de 4mm \sqrt{km} para a precisão dos circuitos de nivelamento, que também foi seguida para a montagem dos circuitos internos aos macrocircuitos, com a rejeição das linhas que causaram erros de fechamento incompatíveis com essa tolerância. O número de linhas nó a nó aceitas e rejeitadas para o A.A.G.P. é também mostrado na tabela 1. O índice de rejeição de linhas nó a nó foi de 7,6 %. Um dos prováveis motivos para os erros apresentados, e a conseqüente rejeição dessas linhas, é o grande período de tempo decorrido entre as diferentes campanhas (trabalhos de campo), o que torna grande a possibilidade de se utilizarem referências de nível abaladas para a partida ou para a chegada de novas linhas.



3.3. Preparo para o Processamento dos Dados

Após a crítica técnica e formal dos dados selecionados, se faz necessária a correção aos erros sistemáticos.

Sabe-se que as correções aos erros sistemáticos que ocorrem freqüentemente em nivelamento geométrico são:

- correção de refração atmosférica;
- correção astronômica (ou correção de marés terrestres); e
- correção ortométrica (ou correção de não paralelismo de superfícies equipotenciais).

Esta última foi aplicada a todos os desníveis da rede altimétrica. Para isso, procedeu-se à pesquisa das coordenadas de cada uma das referências de nível, mediante um programa específico, o qual também faz a crítica e a correção (quando necessário) dessas coordenadas. Essas coordenadas servirão, também, para a geração automática, via “plotter”, de cartas da rede, eliminando as imprecisões e a demora na confecção dos “croquis” manuais.

As restantes não foram aplicadas por não se dispor ainda, em meios magnéticos de armazenamento, de alguns dados necessários como: azimutes de seções de nivelamento, horário das medições e diferenças de temperaturas observadas em pontos específicos próximos às miras verticais de invar.

4. UMA SOLUÇÃO PARA O AJUSTAMENTO DE GRANDES REDES ALTIMÉTRICAS

De um modo geral, quando se trata de ajustamento simultâneo de um conjunto extenso de observações, é necessário um espaço de memória principal de computador demasiadamente grande para o armazenamento e o processamento de todos os dados, o que justificou a sub-divisão da rede em macrocircuitos.

Foi elaborado, então, um programa que executa ajustamentos de seções e de linhas de nivelamento com o emprego de 25 subrotinas e apresenta as seguintes principais etapas de processamento (*Ribeiro, 1989, dissertação de mestrado*) (*Ribeiro, 1988*):



- leitura das referências de nível fixas e suas altitudes (injunções);
- leitura dos dados do arquivo principal (referência de nível de partida e sua latitude, referência de nível de chegada e sua latitude, desnível médio observado, comprimento da seção ou da linha e discrepância acumulada entre o nivelamento e o contra-nivelamento);
- geração da matriz dos coeficientes (das derivadas parciais);
- geração do vetor das referências de nível tipo incógnita;
- geração da matriz dos pesos das observações;
- cálculo de:
 - . correções ortométricas;
 - . desníveis ajustados;
 - . altitudes ajustadas;
 - . resíduos;
 - . matriz variância covariância dos desníveis ajustados;
 - . matriz dos coeficientes de correlação dos desníveis ajustados;
 - . matriz variância covariância dos resíduos;
 - . matriz variância covariância das altitudes ajustadas (parâmetros);
 - . matriz dos coeficientes de correlação das altitudes ajustadas;
 - . resíduos normalizados;
 - . construção do histograma dos resíduos normalizados;
 - . impressão de resultados por iteração.

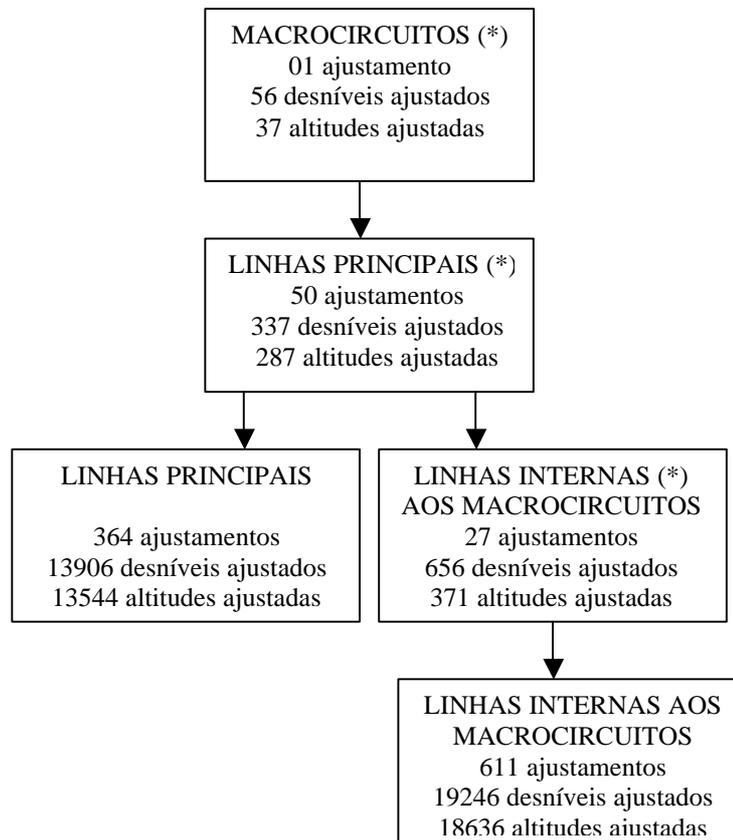
Os métodos para os ajustamentos de redes e de linhas de nivelamento foram estudados e, após essa análise, concluiu-se que o método das equações de observação (ou método dos parâmetros ou das observações indiretas) é mais eficiente nestes casos (*Ribeiro, 1988*). Sendo assim, este método foi o adotado pelo programa de ajustamento de



redes altimétricas, desenvolvido pelo Departamento de Geodésia (Ribeiro, 1989, trabalho do XIV CBC).

4.1. Diagrama de Blocos

A seguir é apresentado um diagrama de blocos onde podem ser identificados os cinco níveis de ajustamentos realizados. Os blocos assinalados com asterisco se referem a ajustamentos de observações nó a nó e os demais blocos se referem a ajustamentos de observações seção a seção.



Em resumo, os totais gerais são:

1197 ajustamentos
37508 desníveis ajustados
36058 altitudes ajustadas

As setas indicam o fluxo de pontos fixos (injunções) entre os blocos.



4.2. Ajustamento de Observações

Com base na metodologia descrita no início deste capítulo, foram executados ajustamentos envolvendo inicialmente, os desníveis nó a nó. A partir do conjunto de altitudes ajustadas das referências de nível tipo nó da rede, foram executados, então, os ajustamentos dos desníveis das seções de nivelamento das linhas, individualmente. Ficaram caracterizados, assim, dois tipos de ajustamento, segundo o tratamento dado às observações: nó a nó e seção a seção.

4.2.1. Nó a Nó

Os ajustamentos dos desníveis e altitudes nó a nó foram responsáveis pela geração das altitudes ajustadas das referências de nível tipo nó da rede. Estas referências de nível são assim denominadas quando há mais de duas linhas partindo ou chegando a ela.

4.2.1.1. Circuitos Principais (macrocircuitos)

Por não ser viável o ajustamento simultâneo de todas as observações, foi então definida uma rede básica contendo os circuitos maiores (macrocircuitos).

No primeiro nível de ajustamento foram ajustados os desníveis, nó a nó, de 19 (dezenove) macrocircuitos da rede básica, em um ajustamento simultâneo, com as seguintes características:

- 1 – Número de observações (desníveis) = 56
- 2 – Número de parâmetros incógnitos (referências de nível com altitudes desconhecidas) = 37
- 3 – Número de pontos fixos (injunções) (referências de nível com altitudes conhecidas e invariáveis) = 01
- 4 – Número de graus de liberdade = 19
- 5 – Número total de referências de nível = 38



6 – Somatório dos quadrados dos resíduos = $0,00019685\text{m}^2$

7 – Variância da unidade de peso a posteriori = $0,00001036\text{m}^2$

8 – Coeficiente de momento de assimetria da distribuição amostral representada pela rede ajustada = 0,43

9 – Coeficiente de momento de curtose (achatamento) da distribuição amostral representada pela rede ajustada = 2,66

Analisando os itens 8 e 9 conclui-se que a distribuição amostral, representada pela rede ajustada, apresentou assimetria negativa – fraca assimetria à esquerda – e é platicúrtica, isto é, a curva de frequência mais achatada que a curva normal de Gauss. Isto pode ser um indicador de erros sistemáticos ainda não totalmente modelados matematicamente ou erros aleatórios presentes nas observações, uma vez que esta rede representa uma amostra estatística relativamente pequena.

4.2.1.2. Linhas Principais

No segundo nível de ajustamento, a partir das altitudes ajustadas das referências de nível tipo incógnita da rede de macrocircuitos ajustada no primeiro nível, foram executados 50 ajustamentos e gerados 337 desníveis ajustados e 287 altitudes ajustadas de novas referências de nível tipo incógnita.

4.2.1.3. Observações internas aos Macrocircuitos

No terceiro nível de ajustamento foram, então, ajustadas as linhas internas aos macrocircuitos e gerados 656 desníveis ajustados e 371 altitudes ajustadas.

4.2.2. Seção a Seção

Os ajustamentos dos desníveis e altitudes seção a seção foram responsáveis pela geração das altitudes ajustadas das referências de nível definidoras das seções ao longo de todas as linhas de nivelamento.



No quarto e no quinto níveis foram finalmente ajustados todos os desníveis das seções de nivelamento e foram gerados 33.152 desníveis ajustados e 32.180 altitudes ajustadas em 975 ajustamentos. Em todos estes casos foi caracterizado 1 (um) grau de liberdade.

4.2.2.1. Linhas Principais

Foram definidas as linhas principais da rede com base nas linhas que compõem os macrocircuitos. Cada linha de nivelamento correspondeu a um ajustamento onde houve altitudes fixas no início e no final da linha. Sendo assim, foram gerados desníveis ajustados e altitudes ajustadas das referências de nível intermediárias.

4.2.2.2. Observações internas aos Macrocircuitos

Internamente a cada um dos 19 (dezenove) macrocircuitos houve ajustamentos dos desníveis e altitudes das referências de nível das seções de nivelamento onde houve também altitudes fixas no início e no final de cada linha.

4.3. O Tratamento das Observações seção a Seção dos ramais de nivelamento.

Não foram incluídas as observações dos ramais de nivelamento no conjunto de dados que foram ajustados porque não há a caracterização de superabundância, uma vez que sempre é desconhecida a altitude do extremo do ramal. Nestes casos, foram criticadas as observações dos ramais, normalmente, e estão sendo transportadas altitudes, a partir dos desníveis médios observados ao longo do ramal e dos resultados do A.A.G.P., para as referências de nível das seções de nivelamento.

5. RESULTADOS DO A.A.G.P.

Os resultados do A.A.G.P. de maior interesse para os usuários, de um modo geral, são as altitudes ajustadas das referências de nível e os desníveis ajustados das



seções de nivelamento. As altitudes e os desníveis que se encontram disponíveis estão expressos em metros com 4 (quatro) casas decimais.

A análise geral dos resíduos foi feita em todos os ajustamentos e foram observados os somatórios dos quadrados dos resíduos de cada ajustamento realizado.

Foi feito o teste de hipóteses estatísticas de adequação (ou bondade) do ajustamento dos macrocircuitos e foi aceita a hipótese básica que afirma que o ajustamento é bom.

Para todos os ajustamentos foram feitos testes de hipóteses estatísticas para a variância populacional (variância da unidade de peso a priori). Em todos os casos houve rejeição da hipótese básica que diz serem iguais às variâncias da unidade de peso a priori e a posteriori. Isto ocorreu devido, principalmente, a não ser conhecida a variância populacional e à ponderação adotada em função dos comprimentos das seções ou das linhas de nivelamento (pesos inversamente proporcionais às distâncias). Existe a intenção de se ajustar um bloco da rede considerando os pesos das observações proporcionais às discrepâncias acumuladas entre o nivelamento e o contra-nivelamento das linhas e comparar os resultados com os obtidos através do A.A.G.P..

5.1. Classificação dos Resultados em Função da Precisão

A avaliação dos resultados dos ajustamentos se deu através da observação dos desvios-padrão dos desníveis ajustados e das altitudes ajustadas das referências de nível. Desta forma comparou-se o erro padrão das linhas após o ajustamento com a tolerância preestabelecida de $2\text{mm}\sqrt{km}$ (IBGE, 1983). Tal erro foi calculado segundo a seguinte expressão:

$$\text{Erro padrão} = \sigma_1 / \sqrt{d_1}$$

Onde:

σ_1 : desvio-padrão do desnível ajustado;

d_1 : comprimento da linha ou da seção de nivelamento.



As linhas de nivelamento que apresentaram erros-padrão, maiores do que a tolerância foram classificadas como DE PRECISÃO e as demais linhas como de ALTA PRECISÃO.

As linhas rejeitadas para a A.A.G.P., mencionadas no item 3.2., foram ajustadas, mas, até a análise final destes casos, as suas altitudes serão divulgadas com restrições quanto à precisão. As altitudes das referências de nível dos ramais de nivelamento, citados no item 4.3., foram classificadas com precisão inferior àquelas do A.A.G.P., uma vez que não foram submetidas a ajustamento algum, e sim transportadas ao longo dos ramais, o que não permite verificar sua confiabilidade.

5.2. Divulgação de Valores Provisórios aos Usuários.

A partir de um arquivo geral de desníveis ajustados das seções de nivelamento e de um outro arquivo contendo as altitudes ajustadas das referências de nível, foi, então, carregado o Banco de Dados Geodésicos com tais valores provisoriamente ajustados. A partir desta etapa tornaram-se disponíveis todas informações importantes para a divulgação. Os resultados provisórios do A.A.G.P. têm validade por um período estimado de 4 a 5 anos. Durante este período serão tratadas as novas linhas de nivelamento com críticas e ajustamentos regionais a partir da rede ajustada no A.A.G.P.. Provavelmente será necessário um novo ajustamento da rede com novas linhas de nivelamento inseridas no cálculo. Está sendo estudada a utilização do sistema denominado GHOST (“Geodetic adjustment using Helmert blocking of Space and Terrestrial data”), que efetua ajustamentos tridimensionais através da técnica de “Helmert Block”, empregado pelo Canadá no Projeto NAD-83 (North American Datum – 1983).

6. DESCENTRALIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO PRELIMINAR DOS DADOS ALTIMÉTRICOS

As Divisões Regionais de Geodésia (DIGED's) já se encontram aptas a criticar e a ajustar preliminarmente pequenas redes e linhas de nivelamento, com o emprego de



versões para microcomputadores dos programas computacionais já mencionados (*Ribeiro & Costa, 1990*) (*Correia, 1990*).

7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O Ajustamento Altimétrico Global Preliminar (A.A.G.P.) forneceu um novo conjunto de valores ajustados, com um tratamento parcialmente informatizado, mas homogêneo. A partir da rede reajustada, os trabalhos de densificação continuam, com o objetivo de atender o estabelecido no Plano Geodésico Brasileiro.

Esta primeira fase do Projeto de Reajustamento da Rede Altimétrica pode ser considerada como um passo inicial para várias outras análises da rede e para pesquisas de alguns resultados obtidos. É de suma importância que tal tratamento tenha sido dado à rede de nivelamento de alta precisão, pois somente desta forma pode-se conhecer como ela se comporta quando submetida a um ajustamento global. Foram analisados os resíduos de todos os desníveis da rede, os desvios-padrão destes desníveis ajustados e os desvios-padrão das altitudes ajustadas das referências de nível.

A partir dos desvios-padrão das altitudes ajustadas das referências de nível tipo nó da rede de macrocircuitos foi elaborada uma carta de isolinhas de precisão e, durante a sua análise, verificou-se que à medida que se afasta do referencial altimétrico de Imbituba (Datum) há uma tendência de aumentar o desvio-padrão de tais altitudes. Percebe-se que, logo em seguida, há uma suavização das curvas (*Ribeiro, 1989, trabalho do XIV CBC*), onde foi registrado um valor de, aproximadamente, 12cm de desvio-padrão para as altitudes de referências de nível localizadas no nordeste brasileiro.

Dentre as atividades previstas para serem desenvolvidas e concluídas pelo Setor de estruturas Altimétricas do IBGE, encontram-se:

- comparações entre antigas e novas (A.A.G.P.) altitudes de referências de nível;
- levantamento completo das conexões com os marégrafos ao longo da costa brasileira e participação como integrante da Comissão de Engenharia Costeira



da Associação Brasileira de Recursos Hídricos da COPPE/UFRJ dedicada ao tema “Elevação Relativa do Nível Médio do Mar na Costa do Brasil”;

- estudo de viabilidade de adoção de um novo referencial altimétrico;
- pesquisas sobre determinação de altitudes científicas a partir de informações gravimétricas;
- pesquisas sobre erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios;
- pesquisas sobre o modelo a ser adotado na aferição de miras verticais de invar e determinação de erro de colimação de níveis (*Ribeiro, 1990*);
- classificação das observações em função do tempo, metodologia de campo e instrumental;
- avaliação de deformações da rede;
- conexão da sub-rede de nivelamento geométrico localizada no Amapá com o restante da rede já ajustada;
- tratamento de novas observações de linhas de nivelamento;
- conexão da rede altimétrica brasileira com as redes altimétricas dos países da América do Sul.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, JOSÉ CLÓVIS MOTTA DE *Ajustamento da Rede de Nivelamento do IBGE*
Anotações técnicas (IBGE) 1976.

CORREIA, JOSÉ DUARTE & LUZ, ROBERTO TEIXEIRA *Sistema de Nivelamento*
(*Notas de Atualização*) Trabalho técnico (IBGE) 1990.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA “Boletim de
Serviço (suplemento) nº 1602 de 1º de agosto de 1983.

RIBEIRO, GILBERTO PESSANHA *Ajustamento Altimétrico Simultâneo e em Fases*
Através dos Métodos das Equações de Observação e das Equações de Condição



Seminário apresentado no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas UFPr – Curitiba – Paraná – 1988.

RIBEIRO, GILBERTO PESSANHA *Ajustamento Altimétrico Através do Método das Equações de Observação e Com Análise Estatística dos Resultados* Trabalho técnico apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Cartografia em Gramado (RS) em 26 de maio de 1989.

RIBEIRO, GILBERTO PESSANHA; LUZ, ROBERTO TEIXEIRA & LOBIANCO, MARIA CRISTINA BARBOSA *Crítica e Análise de dados Iniciais Relativos à Preparação para o Ajustamento de Redes de Nivelamento de Alta Precisão* Trabalho técnico apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Cartografia em Gramado (RS) em 26 de maio de 1989.

RIBEIRO, GILBERTO PESSANHA *Ajustamento Altimétrico Desenvolvido Através do Método das Equações de Observação e com Análise Estatística dos Resultados* Dissertação de Mestrado UFPr – Curitiba – Paraná – 1989.

RIBEIRO, GILBERTO PESSANHA & COSTA, SONIA MARIA ALVES *Ajustamento de Observações Geodésicas* Trabalho técnico (IBGE) 1990.

RIBEIRO, GILBERTO PESSANHA *Aferição de Miras Verticais de Invar* Relatório técnico de viagem no país (IBGE) 1990.