



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

OBSERVATÓRIO NACIONAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Processo de Ajustamento Gravimétrico em Estruturas de Redes de Alta Precisão

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Geofísica

Aluno de doutorado: Francismar Rimoli Berquó

Orientador.....: Iris Pereira Escobar

Co-orientador.....: Andrés Reinaldo Rodriguez Papa

RIO DE JANEIRO - BRASIL
17 DE DEZEMBRO DE 2012

“PROCESSO DE AJUSTAMENTO GRAVIMÉTRICO EM ESTRUTURAS DE REDES DE ALTA PRECISÃO”

FRANCISMAR RIMOLI BERQUÓ

**TESE SBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO RPOGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM GEOFÍSICA.**

Aprovada por:

**Dr. Iris Pereira Escobar
Orientador, Departamento de Engenharia Cartográfica - Uerj**

**Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa
Co-orientador, Departamento de Geofísica, ON/MCTI, e Uerj**

**Ph.D. Jorge Luís Nunes e Silva Brito
Departamento de Engenharia Cartográfica - Uerj**

**Dr. Fernando José Soares e Silva Dias
Departamento de Geofísica, ON/MCTI**

**Dr. Walter Humberto Subiza Piña
Coordenadoria de Cartografia-Gerência de Imageamento - IBGE**

**Dr. Cosme Ferreira da Ponte Neto
Departamento de Geofísica, ON/MCTI**

**RIO DE JANEIRO - BRASIL
17 DE DEZEMBRO DE 2012**

Resumo

O ajustamento de observações gravimétricas é estudado tendo em vista tirar o máximo proveito da moderna tecnologia de medição da gravidade. Os resultados da investigação do modelo matemático, que inclui o favorecimento não linear para os fatores de conversão ao datum por intervalo, são apresentados ao final do ajustamento das observações gravimétricas. Esta investigação é baseada no aprimoramento do modelo matemático linear que foi desenvolvido, em 2001, com base nas transformações das leituras instrumentais, de UI para mGal, medidas com os gravímetros LaCoste & Romberg modelo G. Este favorecimento não linear inclui a remoção dos fatores lineares de escala dos gravímetros usados ao longo de todo o alcance de leitura, ou seja, igualando-os à unidade e utilizando um fator de conversão ao datum gravimétrico por intervalo. A comparação destes valores com os valores ajustados referente aos fatores lineares de escala dos gravímetros foi possível investigar se essa diferença é compatível com a precisão do gravímetro Scintrex CG5 que é 5 microgal. O conjunto de dados da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB), com uma amplitude de aproximadamente 1900 mGal e 11 estações gravimétricas absolutas, foi utilizado como caso de estudo. Os gravímetros diferenciais usados para medir as observações foram os LaCoste & Romberg, modelo G e os Scintrex CG5. Este é o principal objeto de estudo nesta tese de doutorado. As grandezas observáveis envolvidas no modelo são as leituras instrumentais. Os Valores da gravidade nas estações gravimétricas e os fatores de conversão ao datum gravimétrico por intervalo para cada gravímetro foram estimados pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados comprovam boa adaptação deste modelo matemático para ajustamento de redes gravimétricas. O valor da gravidade na estação absoluta IFE-172, localizada em Santa Maria, teve a maior correção estimada em -11,2 microgals (1 microgal = 10 nm/s^2), próximo do desvio padrão estimado inicialmente em 10 microgals. O maior resíduo estimado para uma leitura observada foi 43 microgals, para um desvio padrão estimado inicialmente em 26 microgals. Quanto à apreciação de efeitos não lineares na função de conversão ao datum gravimétrico por intervalo, observa-se, por exemplo, para o gravímetro Scintrex CG5, número de série 308, uma diferença de -0,000292 mGal / UI em relação ao fator linear de escala para o intervalo de leitura na faixa de 3400 - 3500. Como a tabela é discretizada de 100 em 100 unidades, uma leitura neste intervalo está sujeita a um erro de -29,2 microgals. Valores da mesma ordem de grandeza são também observados para outros gravímetros Scintrex CG5. Estes resultados comprovam a necessidade de desenvolver modelos que levem em conta a não linearidade da função de conversão ao datum gravimétrico local em redes gravimétricas de grande extensão.

Abstract

The gravity observation adjustment is studied having in view to take full advantage of the modern technology of gravity measurement. Results of a test performed with the improvement of the mathematical model, that includes the favoring nonlinear conversion factors to the gravimetric datum for interval, are presented in the end of the adjustment. The improvement includes the removal of the linear scale factors of the D&E model. The removal of this linear relationship over the entire read range facilitates the assessment of any non-linear effects in matching of the scales of gravimeters with reference gravimetric scale used in the adjustment, through a conversion function to the gravimetric datum. The comparison of the linear scale factors of gravimeters with the conversion factors to the gravimetric datum for interval was possible to investigate if this difference is compatible with the accuracy of gravimeter Scintrex CG5, of 5 microgal. The data set of the Brazilian Fundamental Gravity Network (BGFN), with about 1900 mGal gravity range and 11 control station, was used as case study.. The observables involved in the model are instrumental readings. Gravity values on stations in the network and the datum conversion factors, per interval, were estimated for each gravimeter by the least squares method. The results indicate good adaptation of the refinement of the model for D & E on the network gravimetric adjustment. The gravity value at the reference station IFE-172, located in Santa Maria, had the largest estimated correction of -11.2 microgals (1 microgal = 10 nm/s^2), close to the standard deviation, estimated initially at 10 microgals. The largest residual estimated for a reading was 43 microgals to a standard deviation initially estimated in 26 microgals. The assessment of nonlinear effects on the function of the local datum conversion, shows a difference of -0.000292 mGal / UI for the Scintrex CG5 gravimeter, serial number 40308 with respect to the factor estimated by the linear scale D&E model, for the reading interval in the range 3400-3500. Because the table is discretized in 100 of 100 units, a reading in this range would be subject to an error of -29.2 microgals. Values of the same order of magnitude are also observed for other Scintrex CG5 gravimeters. This result indicates the need to develop models that take into account the non-linearity of the conversion function to the local gravity datum in adjustment of a network with a large reading range.

Agradecimentos

Sou particularmente grato aos Professores Dr. Iris Pereira Escobar e Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa, orientador e co-orientador deste trabalho, respectivamente, pelas inúmeras sugestões ao projeto desenvolvido durante este período de pós-graduação. Do mesmo modo, manifesto meus agradecimentos às pessoas e instituições abaixo:

À CAPES por financiar a bolsa de estudo

Ao Departamento de Geofísica, do Observatório Nacional.

Ao meu amigo Alcides Antônio dos Santos, onde essa amizade foi construída com o decorrer do tempo.

Aos meus amigos de pós-graduação e do Departamento de Geofísica pelas inúmeras conversas e ideias.

Ao Instituto Federal Fluminense – IFF, pela compreensão desta etapa na minha vida e por abrir as portas para eu seguir com a minha carreira profissional.

À minha família, pelo suporte e carinho dedico ao longo desta jornada:

À minha querida e amada filha Júlia da Cunha Berquó.

À minha esposa Lourdes Ferreira da Cunha.

À minha mãe Maria de Lourdes Rimoli Berquó.

Ao meu Irmão Francisco José Rimoli Berquó.

Sumário

Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos	v
Sumário	vi

Capítulo 1 – Introdução

1.1 - Considerações Gerais	01
1.2 - Objetivos	02
1.2.1 - Objetivos gerais	02
1.2.2 - Objetivos específicos	02
1.3 - Estrutura gerais	02

Capítulo 2 - A Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira

2.1 - Introdução	04
2.2 - As estações absolutas da RGFB	06
2.3 - A Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras	07

Capítulo 3 - Tratamento dos dados da RGFB

3.1 - Introdução	10
3.2 - Efeitos nas observações gravimétricas	11
3.2.1 - A correção da função de calibração	12
3.2.2 - A correção da maré luni-solar	12
3.2.3 - A correção da deriva instrumental	13
3.2.4 - A correção do nivelamento (<i>Tilt</i>)	17
3.2.5 - A correção do filtro sísmico (<i>Seismic filter</i>)	18
3.2.6 - A correção da elevação	18
3.2.7 - As correções não consideradas na Pesquisa	20
3.3 - O valor da leitura instrumental em cada estação gravimétrica	21
3.4 - As ponderações das grandezas envolvidas	22

Capítulo 4 - Os modelos matemáticos usados no ajustamento da RGFB

4.1 - Considerações Físicas	23
4.2 - O método combinado	24
4.3 - O método combinado com injunções relativas	25
4.4 - As incertezas dos parâmetros	27
4.5 - O modelo matemático de Dias e Escobar (2001)	27
4.6 - Formulação do modelo matemático proposto	30
4.6.1 - A matriz A dos coeficientes dos parâmetros	32
4.6.2 - A matriz B dos coeficientes das observações	33
4.6.3 - O vetor erro de fechamento	34

Capítulo 5 - Resultados e discussões

5.1 - Introdução	35
5.2 - Aplicação do modelo matemático D&E	36
5.3 - Aplicação do aprimoramento do modelo D&E	45

Capítulo 6 - Conclusões

52

Apêndice I - As descrições das 8 novas estações gravimétricas da LC ON-AN para atender as necessidades dos gravímetros diferenciais Scintrex CG5.....

54

Apêndice II - Os valores dos coeficientes das funções de calibração dos gravímetros diferenciais LCR e CG5 estimados pelo modelo D&E

63

Apêndice III - Os valores dos fatores de conversão ao datum gravimétrico local por intervalo, em tabelas e em figuras, estimados no ajustamento para cada gravímetro diferencial LCR e CG5 pelo aprimoramento do modelo D&E

85

Referências Bibliográficas

103

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Considerações gerais

A gravimetria tem experimentado desenvolvimento considerável nos últimos anos, tanto na técnica de medição absoluta como na relativa. Os modernos gravímetros possibilitam observações com precisão de 5 microgals ($1 \text{ microgal} = 10 \text{ nm/s}^2$), o que significa um aprimoramento de pelo menos uma ordem de grandeza em relação aos instrumentos LaCoste & Romberg, modelo G. Essa realização aconselha a revisão da técnica de processamento de observações gravimétricas, visando aproveitar plenamente a moderna tecnologia instrumental. Esse cuidado é essencialmente recomendado quando os pontos de observação são projetados em estrutura de rede de referência para futuros levantamentos. Nesse caso, a qualidade dos resultados deve ser a melhor possível, assegurando alta precisão e homogeneidade aos valores de gravidade da rede. Portanto, o levantamento de uma rede de referência envolve, obrigatoriamente, a aquisição de dados redundantes e diferentes instrumentos. Isso implica na necessidade de ajustar as observações com um modelo matemático adequado e condições impostas para remover as ambiguidades.

Dias e Escobar (2001) desenvolveram um modelo linear para ajustamento gravimétrico, aqui denominado modelo D&E, que foi aplicado a uma linha de estações gravimétricas estendida de norte a sul do Brasil. Este modelo matemático foi desenvolvido para ajustamento de observações tendo como base a transformação das leituras instrumentais dos gravímetros LaCoste & Romberg modelo G, de UI¹ para mGal. As grandezas observáveis são as leituras instrumentais corrigidas da deriva instrumental e maré luni-solar, expressas em UI, e os coeficientes das funções de calibração dos gravímetros. Como parâmetros, têm-se os valores da gravidade e os fatores lineares de escala dos gravímetros LaCoste & Romberg, modelo G (LCR). O modelo D&E pode ser aplicado para qualquer gravímetro diferencial como, por exemplo, aos gravímetros diferenciais Scintrex CG5 que são os principais objetos de estudo desta tese de doutorado. Este trabalho propõe a aplicação do modelo D&E no

¹ UI é unidade instrumentais

ajustamento de redes gravimétricas de alta precisão visando aprimorá-lo para a precisão das observações instrumentais em nível de microgal, principalmente no que concerne ao comportamento linear ou não da função de conversão ao datum gravimétrico local. Com este propósito foram usados os dados da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (Escobar, 1987), aqui nomeada de RGFB, adicionando medidas realizadas na Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras com o mais moderno gravímetro diferencial Scintrex CG5, aqui nomeado CG5.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo geral

Levantar e reunir observações dos gravímetros CG5, de maneira que se possa contribuir para sua análise com o modelo matemático proposto nesta tese de doutorado e estender a aplicação do modelo D&E e, principalmente, do seu aprimoramento aos gravímetros Scintrex CG5.

1.2.2 – Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta Tese de doutorado, listam-se os seguintes itens:

- A. Investigar o comportamento do modelo matemático D&E no ajustamento da RGFB com o novo conjunto de observações.
- B. Investigar a necessidade de realizar um aprimoramento do modelo D&E tendo em vista um eventual comportamento não linear das funções de conversão ao datum gravimétrico local por intervalo no ajustamento.
- C. Criar uma tabela de conversão das leituras instrumentais, de UI para mGal, de modo que se possam adaptar as observações realizadas com os gravímetros CG5 aos modelos matemáticos envolvidos no ajustamento.
- D. Investigar se apenas um fator de escala para conversão de datum gravimétrico será ou não suficiente para obter precisão na ordem do microgal.

1.3 – Estrutura da Tese

Esta Tese apresenta-se organizada em 6 capítulos incluindo esse capítulo introdutório. Os capítulos seguintes foram desenvolvidos com os seguintes propósitos:

O capítulo 2 descreve a RGFB e a Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras, que foi utilizada também para analisar as observações dos gravímetros CG5, a aquisição das observações e as campanhas dos gravímetros usados no decorrer do tempo para melhorar a precisão desta rede de referência.

O capítulo 3 descreve o tratamento dos dados da RGFB, ou seja, o procedimento inicial dos levantamentos gravimétricos, as correções que foram aplicadas nas observações e as ponderações das grandezas observáveis.

O capítulo 4 mostra o desenvolvimento matemático do modelo D&E e, principalmente do seu aprimoramento, bem como os resultados e discussões destes modelos matemáticos.

O capítulo 5 apresenta a aplicação dos modelos matemáticos no ajustamento da RGFB e a análise de seus resultados.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões desta tese de doutorado e algumas sugestões para trabalho futuros.

Capítulo 2

A Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira

2.1 – Introdução

Em 1976, Lélio Gama iniciou a implantação de uma rede gravimétrica de referência de alta precisão para reunir em um único sistema, preciso e homogêneo, todas as informações gravimétricas do Brasil. Entretanto, o Observatório Nacional já realizava trabalhos científicos em gravimetria nas regiões sul, centro-oeste e nordeste (Gama, 1972; Gama, 1973). Segundo Escobar (1987), nos levantamentos da RGFB foram utilizados apenas gravímetros diferenciais LCR sob uma metodologia muito rigorosa tendo como datum e escala as estações da *International Gravity Standardization Net 1971, IGSN-71*.

A RGFB estende-se por todo o Território Nacional (Figura 2.1) incluindo algumas estações gravimétricas localizadas no Uruguai e na Venezuela, cobrindo uma amplitude de gravidade de 1919 mGal. É constituída de 6976 intervalos de gravidade totais, ou 13952 observações, distribuídas por 534 estações gravimétricas (Tab.2.1), das quais 11 são estações gravimétricas absolutas (Tab.2.2) determinadas com gravímetro absoluto balístico de queda livre (Torge *et al*, 1994). Agrupando as medidas referentes aos mesmos intervalos da gravidade pelos gravímetros que participaram da aquisição das leituras instrumentais obteve-se 1739 intervalos da gravidade distintos inseridos no ajustamento da RGFB. Os 21 gravímetros diferenciais utilizados são: 16 LCR e 5 CG5.

As estações da Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras, aqui nomeada de LC ON-AN, fazem parte do acervo de estações da RGFB. Com isso, as observações gravimétricas que foram medidas com os gravímetros CG5 estão incluídas no ajustamento.

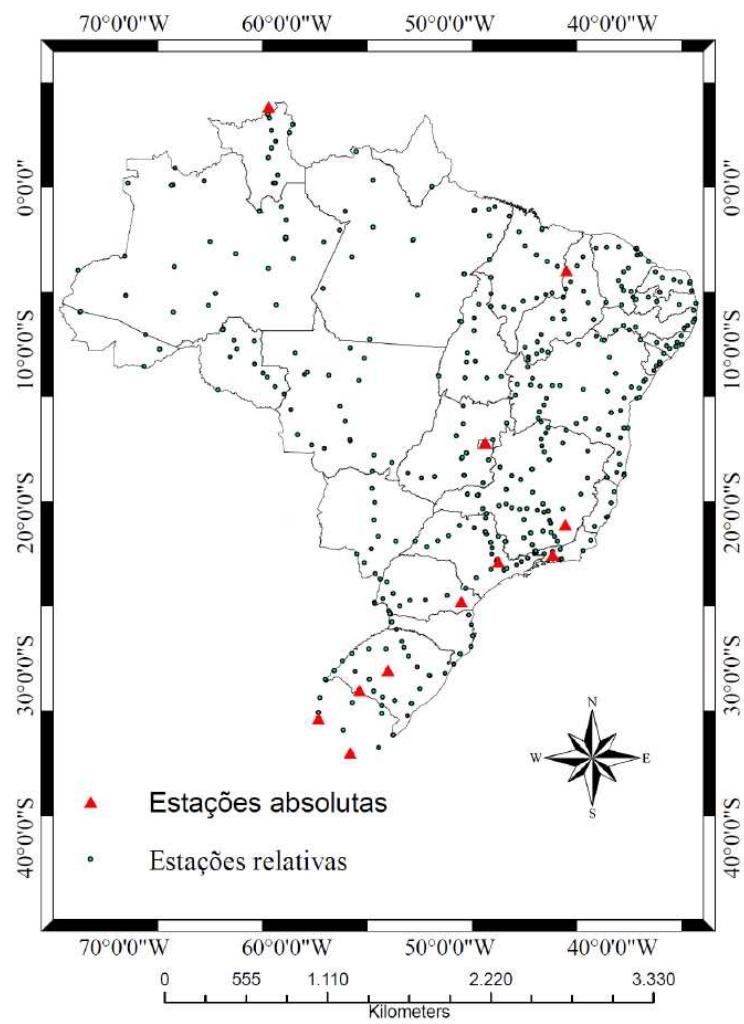


Figura 2.1 A distribuição das 534 estações gravimétricas da RGFB, sendo 11 absolutas.

Tabela 2.1 Estatística das observações com os gravímetros LCR e CG5 usados na RGFB.

Gravímetros diferenciais	Menor leitura (mGal)	Maior leitura (mGal)	Δg			
			Bons	%	Rejeitados	%
LCR - 602	1306.	3221.	1082	94	65	6
LCR - 622	1431.	3264.	863	95	42	5
LCR - 061	1470.	2322.	1141	96	52	4
LCR - 257	1524.	2962.	2120	95	100	5
LCR - 041	1521.	2331.	113	97	3	3
LCR - 011	1610.	2370.	91	76	28	24
LCR - 454	1634.	3200.	92	97	3	3
LCR - 613	2010.	2783.	20	91	2	9
LCR - 628	1547.	2316.	20	91	2	9
LCR - 674	1425.	2330.	430	88	57	12
LCR - 013	2881.	3303.	41	87	6	13
LCR - 703	2849.	3281.	46	98	1	2
LCR - 190	2458.	2954.	17	74	6	26
LCR - 194	2463.	2961.	19	83	4	17
LCR - 231	1889.	2328.	6	100	0	0
LCR - 372	1669.	2506.	23	96	1	4

Gravímetros diferenciais	Menor leitura (mGal)	Maior leitura (mGal)	Δg			
			Bons	%	Rejeitados	%
CG5 - 308 ²	2991.	3616.	67	93	5	7
CG5 - 343 ²	7403.	8027.	143	99	1	1
CG5 - 347 ²	3290.	3911.	71	99	1	1
CG5 - 600 ²	2812.	3433.	72	100	0	0
CG5 - 839 ²	2636.	3272.	118	98	2	2
Total			6595	94	381	6

2.2 – As estações absolutas da RGFB

O Instituto Für Erdmessung (IFE), Universidade de Hannover, Alemanha, realizou um projeto de medidas absolutas com o gravímetro JILAG-3 em alguns países da América do Sul (Torge *et al*, 1994). Esse projeto inclui 22 estações distribuídas nos seguintes países: 6 na Argentina; 7 no Brasil; 3 no Uruguai e 6 na Venezuela. As medidas absolutas foram realizadas no período de 1988 a 1991. Dentre estas 22 estações gravimétricas 11 foram utilizadas no ajustamento da RGFB, que estão apresentadas na Tab.2.2.

Tabela 2.2 As 11 estações gravimétricas absolutas do ajustamento da RGFB.

Código da estação	Localização das estações	Valor de gravidade (mGal)	Desvio padrão (mGal)
IFE040	Sta. Elena Uairen (VEN)	977822,084	0,010
IFE112	Teresina (BRA)	978016,343	0,010
IFE122	Brasília (BRA)	978048,798	0,010
IFE132	Viçosa (BRA)	978460,230	0,010
IFE142	Vassouras (BRA)	978637,581	0,010
IFE152	Vinhedo (BRA)	978563,778	0,010
IFE162	Curitiba (BRA)	978760,387	0,010
IFE172	Santa Maria (BRA)	979261,636	0,010
IFE212	Rivera (URU)	979344,377	0,010
IFE222	Toledo (URU)	979715,855	0,010
IFE232	Paysandu (URU)	979523,526	0,010

² Os três primeiros gravímetros CG5 pertencem ao PegBr (Pool de Equipamentos Geofísicos do Brasil) e os outros dois, ao Departamento de Geofísica do Observatório Nacional/Rio de Janeiro, Brasil.

2.3 – A Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras.

Um dos objetivos de ocupar as estações da linha de calibração é investigar os coeficientes das funções de calibração ou uma parte deles. Estes coeficientes têm a função de converter as leituras instrumentais, obtidas em unidades instrumentais para mGal. Existem algumas linhas de calibração gravimétricas que também têm o mesmo objetivo, por exemplo: Vieira *et al* (2002), Wenzel (1996), Escobar *et al* (1996) e Xu *et al* (1988).

Segundo Escobar *et al* (1996), a implantação dessa linha de calibração vertical até o parque Nacional de Itatiaia, próximo ao pico das Agulhas Negras tem o objetivo de monitorar os gravímetros diferenciais. Esta linha de calibração explora a variação da gravidade com a altitude e também o comportamento destes instrumentos com a variação da temperatura e pressão, podendo-se verificar o desempenho dos seus dispositivos térmicos e barométricos destes instrumentos.

O percurso do Observatório Nacional até o Parque de Itatiaia tem aproximadamente 250 quilômetros de comprimento e envolve uma diferença de altitude da ordem de 2.500 metros com uma amplitude da gravidade de 628 mGal.

Originalmente, a LC ON-AN era composta por 5 estações gravimétricas da RGFB e, atualmente, já houve medições absolutas nestas estações (Sousa e Santos, 2010). Estes valores absolutos não foram utilizados nesta Tese. Recentemente, após uma reestruturação para atender as características dos gravímetros CG5, passou a ter 13 estações, onde 8 estações são novas³ (Apêndice I), distribuídas em 12 intervalos da gravidade com amplitudes de aproximadamente 50 mGal (Fig.2.2 e Tab.2.3), exceto nos intervalos CAL2-2 – CAL-03 e CAL-03 – CAL-04. Esta densificação da LC ON-AN ocorreu porque o gravímetro CG5 possui uma resolução das leituras instrumentais de 1 microgal e precisão de 5 microgals (Scintrex, 2010). Valores de resíduos na ordem do microgal são esperados no ajustamento das observações. Então, as funções de conversão ao datum devem atender um número maior de menos magnitude, para melhor monitorar as variações nas funções de calibração. O levantamento gravimétrico com os gravímetros CG5 totalizou 480 observações, tendo 98% de observações de boa qualidade, ou seja, não foram rejeitadas pelos critérios de rejeição que veremos no capítulo 3 dados pelas Eqs. (3.4) e (3.5).

³ Os gravímetro CG5 foram manuseados, pelo técnico do Observatório Nacional Alcides Antônio dos Santos e pelo próprio aluno de doutorado Francismar Rimoli Berquó, nas 13 estações gravimétricas que compõem a LC ON-AN.

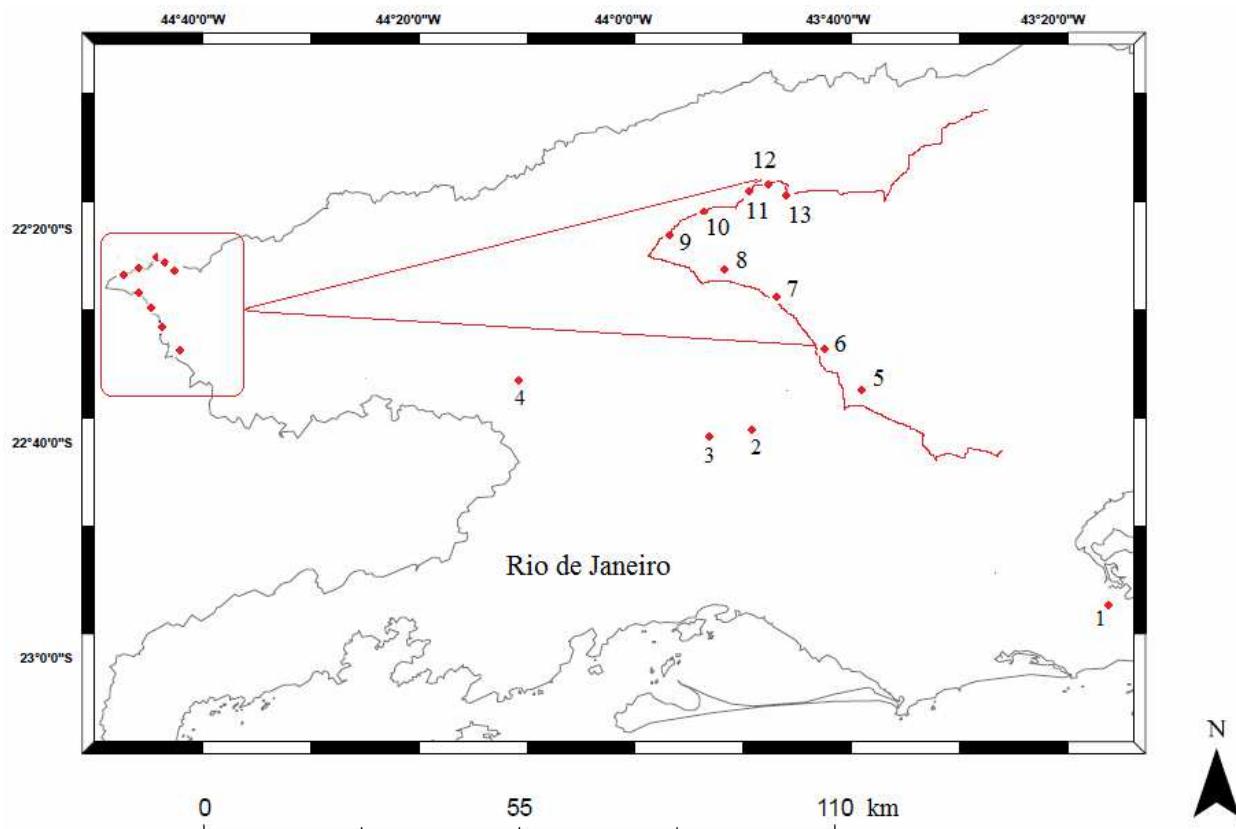


Figura 2.2 A distribuição das 13 estações gravimétricas da LC ON-AN: 1 – Rio de Janeiro “C”; 2 – Paracambi 1/4; 3 – Obelisco da Serra; 4 – Barra Mansa; 5 – Engenheiro Passos; 6 – km 18; 7 – Capela São José; 8 – Fazenda Lapa; 9 – Marco Zero; 10 – CAL4-2; 11- CAL4-4; 12 – CAL4-5; 13 – Posto do IBAMA.

Tabela 2.3 As estações gravimétricas, da LC ON-AN, e os valores dos intervalos da gravidade.

Estação gravimétrica		Coordenadas		
Código	Localização	Latitude	Longitude	Altitude
016080	Rio de Janeiro “C”	-22°53'43”	-43°13'31”	18 m
CAL1-1	Paracambi 1/4	-22°53'43”	-43°13'31”	65 m
CAL1-2	Obelisco na Serra	-22°39'56”	-43°50'27”	432 m
CAL1-3	Barra Mansa	-22°32'44”	-44°10'16”	423 m
CAL-02	Engenheiro Passos	-22°29'48”	-44°40'42”	500 m
CAL2-1	km 18	-22°27'51”	-44°43'03”	664 m
CAL2-2	Capela São José	-22°26'23”	-44°44'10”	867 m
CAL-03	Fazenda Lapa	-22°24'12”	-44°45'06”	1300 m
CAL-04	Marco Zero	-22°22'36”	-44°45'36”	1669 m
CAL4-2	CAL4-2	-22°22'05”	-44°44'58”	1910 m
CAL4-4	CAL4-4	-22°21'27”	-44°44'14”	2138 m
CAL4-5	CAL4-5	-22°22'15”	-44°42'21”	2376 m
CAL-05	Posto do IBAMA	-22°22'24”	-44°42'24”	2500 m

Intervalos da gravidade entre as estações	
Códigos das estações	Valores dos Δg (mGal)
016080 → CAL1-1	47
CAL1-1 → CAL1-2	78
CAL1-2 → CAL1-3	19
CAL1-3 → CAL-02	47
CAL-02 → CAL2-1	45
CAL2-1 → CAL2-2	50
CAL2-2 → CAL-03	87
CAL-03 → CAL-04	94
CAL-04 → CAL4-2	49
CAL4-2 → CAL4-4	50
CAL4-4 → CAL4-5	49
CAL4-5 → CAL-05	15

Capítulo 3

Tratamento dos dados da RGFB

3.1 – Introdução

Com o objetivo de analisar o gravímetro CG5 a partir do modelo matemático D&E e, principalmente, de seu aprimoramento foram desenvolvidos três algoritmos.

O primeiro algoritmo foi desenvolvido para realizar uma análise prévia das leituras instrumentais observadas, onde são feitas as correções sistemáticas devidas à deriva instrumental e ao efeito da maré luni-solar, ambas em UI. Além de outros tipos de correções como veremos no decorrer deste capítulo. A partir de dois critérios de rejeição que são 50 microgals (Dias, p.38, 1997) e um tempo de 24 horas (por causa da deriva instrumental dos gravímetros), realiza-se uma análise comparativa entre os intervalos de gravidade corrigidos com a estimativa dos intervalos da gravidade a partir da média ponderada com o inverso do tempo. Os intervalos da gravidade corrigidos que apresentarem uma diferença superior aos critérios de rejeição serão descartados e uma nova média calculada, repetindo-se o processo.

No segundo algoritmo, calcula-se o valor das leituras instrumentais em cada estação gravimétrica, por trajeto e gravímetro, após análise com o programa anterior. Para a estação gravimétrica inicial, realiza-se a média aritmética dos valores das leituras instrumentais corrigidas, em UI, e para a estação subsequente a soma deste valor ao do intervalo de gravidade estimado pela média aritmética ponderada.

Por último, utiliza-se um terceiro algoritmo baseado no modelo D&E. Este algoritmo envolve o ajustamento da RGFB a partir da formulação dos mínimos quadrados ponderado, para o modelo proposto nesta tese de doutorado, onde os fatores lineares de escala dos gravímetros são igualados a unidade e a inserção de fatores de conversão ao datum gravimétrico por intervalo, favorecendo a manifestação de eventual comportamento não linear. Ao final do processamento, o programa emite um relatório com os valores ajustados e uma análise estatística dos resultados.

3.2 – Efeitos nas observações gravimétricas

Compreendam-se as observações gravimétricas como sendo as leituras instrumentais, sejam elas em UI (gravímetro LCR) ou em mGal (gravímetro CG5). As datas e os instantes em que essas observações foram medidas no campo, e também as coordenadas planimétricas das estações gravimétricas.

As observações dos gravímetros diferenciais LCR utilizadas desde a criação da RGFB, até a presente data, possuem erros de diversas fontes corrigidos antes do ajustamento. As observações dos gravímetros CG5 já são corrigidas pelo sistema interno do gravímetro, durante sua aquisição (Fig.3.1).

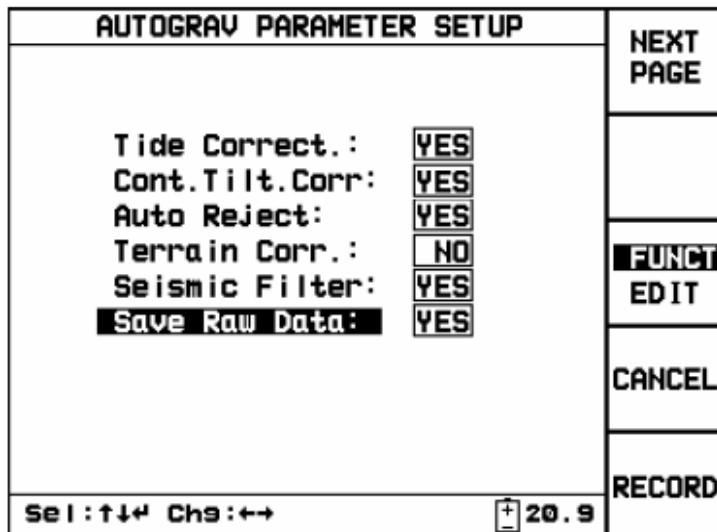


Figura 3.1 Seleção das correções a serem aplicadas automaticamente pelo sistema do gravímetro CG5 às observações gravimétricas.

As observações gravimétricas foram medidas, no mínimo, três vezes em cada uma das estações gravimétricas num intervalo de tempo de 1 minuto entre elas. Essas medidas não são constantes. Isto se deve ao fato de que variações ocorrem durante as medições. No tratamento das observações gravimétricas realizado neste trabalho de doutorado, as variações incluídas foram à deriva instrumental e o efeito da maré luni-solar, por serem as variações mais notáveis durante a aquisição. Outras não foram objeto de tratamento como, por exemplo: (i) de pressão, (ii) temperatura, (iii) magnetização; e (iv) massa de água subterrânea (ver item 3.2.7).

3.2.1 - A correção da função de calibração

Os coeficientes da função de calibração servem para converter as leituras instrumentais, de UI para mGal. Os gravímetros LCR, modelo G, são exemplos desta conversão das suas leituras instrumentais (Tab.3.1). Estes coeficientes são apresentados pelo fabricante e cada gravímetro tem a sua tabela de calibração, discretizada em intervalos fixos de 100 UI. Os gravímetros CG5 não têm uma tabela de conversão, apenas um fator de conversão já alocado no seu sistema interno para realizar as conversões nas leituras instrumentais e fornecê-las em unidades de mGal.

Tabela 3.1 Parte da tabela de calibração do gravímetro LCR G061 fornecida pela fabricante.

Leitura do dial	Valor da leitura em mGal	Coeficientes da função de calibração
0	000.00	1.03705
100	103.71	1.03710
200	207.42	1.03720
300	311.14	1.03725
....
....

3.2.2 - A correção da maré luni-solar

A interação gravitacional da Terra com outros corpos celestes provoca variações periódicas na gravidade em consequência da mudança de suas distâncias relativas no instante da observação. Os efeitos das interações Terra-Lua e Terra-Sol nas observações, nesta tese de doutorado, foram tratados pelas fórmulas de Longman (Longman, 1959) com um fator gravimétrico de 1,16 (Freitas, 1993; Scintrex, 2010). As correções para os outros astros foram desprezadas. A intensidade máxima entre os campos de maré lunar e solar são, respectivamente: 0,166 mGal e 0,061 mGal. Assim, a intensidade máxima deste efeito é de 0,227 mGal, que é significativo com a atual precisão dos gravímetros LCR e CG5. Então, este efeito deve ser levado em consideração nos levantamentos gravimétricos.

A determinação do efeito da maré luni-solar, em unidades instrumentais (UI), é:

$$\xi = \frac{\zeta_o}{\alpha}, \quad (3.1)$$

onde ζ é o valor da correção da maré luni-solar, em UI; ζ_o é o valor da correção da maré luni-solar, em mGal, estimado pelas fórmulas de Longman; e α é o coeficiente da função de calibração dada pela tabela do gravímetro em correspondência com o valor da leitura instrumental.

Para o gravímetro CG5, que é baseado em um sistema elástico de quartzo fundido cobrindo uma amplitude de gravidade de aproximadamente 8000 mGal sem sofrer ajuste, tendo uma resolução de leitura de 1 microgal, é essencial a definição dos parâmetros iniciais que serão selecionados pelo operador (Fig.3.1). Este efeito da maré luni-solar é selecionável e o sistema interno do gravímetro CG5 o corrige no instante real que as observações foram medidas. As coordenadas Latitude e Longitude podem ser medidas com o GPS, que é fornecido pelo fabricante, e é conectado na porta COM2 do gravímetro CG5 (Fig.3.2), ou entrar com os valores numéricos, da Latitude e da Longitude, digitados pelo operador. Para as observações dos gravímetros LCR, também foram corrigidas deste efeito utilizando as mesmas fórmulas de Longman e o mesmo fator gravimétrico.



Figura 3.2 O gravímetro CG5, em operação, conectado com o GPS.

3.2.3 - A correção da deriva instrumental

As leituras instrumentais têm como resultados imediatos as diferenças de gravidade entre duas estações arbitrárias de ordem i e j . Estas medidas sofrem variações progressivas e lentas com o decorrer do tempo e têm a sua origem causada pelas deformações elásticas do sistema que é conhecida como deriva instrumental (Parseliunas *et al*, 2011). Consequentemente, as leituras tomadas em um mesmo ponto em épocas diferentes serão discordantes, sem que a gravidade tenha variado. Portanto, a deriva instrumental é inerente ao instrumento e depende das condições a que o equipamento geofísico é submetido. Por

exemplo, têm-se as variações de temperatura, vibrações, impactos e alguns outros fatores (Angus and Brulé, 1967). Neste trabalho, antes de iniciar as medições das leituras instrumentais, os gravímetros CG5 ficaram nivelados e em repouso sobre o local durante 20 minutos para a estabilização do seu sistema elástico.

Na campanha para o levantamento gravimétrico da LC ON-AN, os gravímetros CG5 foram acomodados sobre o banco traseiro do carro e protegidos por espumas para evitar possíveis vibrações bruscas nos percursos entre as estações gravimétricas que compõem a linha de calibração. Durante o tempo em que foram efetuadas paradas nos deslocamentos, tomou-se o cuidado com a variação da temperatura brusca a que o instrumento poderia ser submetido; por isso o transporte ficou estacionado em locais com sombra e com seus vidros parcialmente abertos para evitar possível aumento de temperatura no seu interior, podendo acarretar algum efeito no sistema elástico do instrumento o que comprometeria as medidas pela deriva estática⁴.

O controle e a correção da deriva instrumental são realizados por reocupações de estações gravimétricas. Geralmente, estas estações gravimétricas estão com outras da mesma rede de referência, ou de outra rede gravimétrica. Segundo Schüller (2000), existe alguns tipos de conexões entre as estações gravimétricas e, a partir delas, pode-se planejar um controle melhor da taxa de deriva instrumental do gravímetro. Os circuitos terrestres de ida-e-volta, do tipo A-B-...-N-...-B-A, foram desenvolvidos para controlar a deriva instrumental de modo eficiente e também eventuais erros nas observações individuais e saltos (variações bruscas e intensas das leituras). Estes circuitos de ida-e-volta foram concluídos num intervalo de tempo máximo de 13,5 horas possibilitando que a deriva instrumental seja tratada linearmente, onde o intervalo de tempo máximo é de 24 horas.

Como foi dito anteriormente, a deriva instrumental depende das condições ambientais às quais o gravímetro é submetido. Recomenda-se não utilizar um valor fixo para a taxa de deriva para todos os intervalos da gravidade. Com isso, considera-se uma taxa de deriva para cada intervalo da gravidade observado com o gravímetro. Então, o procedimento utilizado, na presente pesquisa, foi corrigir a deriva instrumental para cada intervalo de gravidade medido por cada gravímetro antes do ajustamento (Dias e Escobar, 2001). Pode-se verificar nas seguintes tabelas (Tabs.3.2 até 3.6), que os gravímetros CG5 submetidos as condições ambientais apresentaram valores de deriva dinâmica altos comparados com o valor do manual de 0,020mGals/dia (Scintrex, p.242, 2010).

⁴ Deriva estática é a diferença de leituras instrumentais, em mGal, corrigida da maré luni-solar, quando o gravímetro diferencial fica em repouso durante um intervalo de tempo considerável (≥ 1 hora). Essa diferença é subtraída algebricamente a todas as outras leituras instrumentais que serão medidas posteriormente.

Em cada estação gravimétrica a deriva dinâmica foi calculada a partir da diferença de leitura instrumental inicial e final, corrigida da maré luni-solar e da deriva estática dividida pelo tempo gasto. Com isso, pode-se corrigir cada leitura instrumental, exceto para a primeira estação gravimétrica, da deriva dinâmica. Para tal, multiplica-se essa divisão pelo tempo que o gravímetro ficou em movimento para realizar a respectiva medida.

Tabela 3.2 Os valores estimados para a deriva dinâmica referentes ao gravímetro CG 308.

Data	Trajeto	Tempo (horas)	Deriva dinâmica (mGal/h)
21/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,075
22/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,025
23/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,024
26/09/2011	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	13,5	-0,021
27/09/2011 ⁵	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	7,0	-0,020
27/09/2011 ⁶	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	6,0	-0,040
28/09/2011 ⁵	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,0	-0,017
28/09/2011 ⁶	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,0	-0,039

Tabela 3.3 Os valores estimados para a deriva dinâmica referentes ao gravímetro CG 343.

Data	Trajeto	Tempo (horas)	Deriva dinâmica (mGal/h)
21/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,030
22/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,5	-0,034
23/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,019
26/09/2011	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	13,5	-0,030
27/09/2011 ⁵	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	7,0	-0,034
27/09/2011 ⁶	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	6,0	-0,034
28/09/2011 ⁵	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,5	-0,031
28/09/2011 ⁶	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,0	-0,035
08/02/2012	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	8,5	-0,017
09/02/2012	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	8,5	-0,019
10/02/2012	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	8,5	-0,018
11/02/2012	CAL02 → CAL1-3 → CAL1-2 → CAL1-1 → 016080	12,0	-0,024

⁵ Medidas realizadas na parte da manhã.

⁶ Medidas realizadas na parte da tarde.

Data	Trajeto	Tempo (horas)	Deriva dinâmica (mGal/h)
12/02/2012	CAL02 → CAL1-3 → CAL1-2 → CAL1-1 → 016080	13,0	-0,034
13/02/2012	CAL02 → CAL1-3 → CAL1-2 → CAL1-1 → 016080	12,5	-0,025
14/02/2012	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	7,5	-0,032
15/02/2012	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	6,0	-0,025
16/02/2012	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	5,5	-0,037

Tabela 3.4 Os valores estimados para a deriva dinâmica referentes ao gravímetro CG 347.

Data	Trajeto	Tempo (horas)	Deriva dinâmica (mGal/h)
21/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,054
22/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,5	-0,052
23/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	11,5	-0,062
26/09/2011	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	13,5	-0,051
27/09/2011 ⁵	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	5,5	-0,054
27/09/2011 ⁶	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	7,0	-0,047
28/09/2011 ⁵	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,5	-0,052
28/09/2011 ⁶	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,0	-0,055

Tabela 3.5 Os valores estimados para a deriva dinâmica referentes ao gravímetro CG 600.

Data	Trajeto	Tempo (horas)	Deriva dinâmica (mGal/h)
21/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,0	-0,054
22/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	12,5	-0,057
23/09/2011	016080 → CAL1-1 → CAL1-2 → CAL1-3 → CAL02	11,5	-0,056
26/09/2011	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	13,5	-0,056
27/09/2011 ⁵	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	5,5	-0,056
27/09/2011 ⁶	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	6,0	-0,058
28/09/2011 ⁵	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,5	-0,054
28/09/2011 ⁶	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	5,0	-0,058

Tabela 3.6 Os valores estimados para a deriva dinâmica referentes ao gravímetro CG 839.

Data	Trajeto	Tempo (horas)	Deriva dinâmica (mGal/h)
08/02/2012	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	8,5	-0,084
09/02/2012	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	8,5	-0,086
10/02/2012	CAL04 → CAL4-2 → CAL4-4 → CAL4-5 → CAL05	8,5	-0,087
11/02/2012	CAL02 → CAL1-3 → CAL1-2 → CAL1-1 → 016080	12,0	-0,097
12/02/2012	CAL02 → CAL1-3 → CAL1-2 → CAL1-1 → 016080	13,0	-0,104
13/02/2012	CAL02 → CAL1-3 → CAL1-2 → CAL1-1 → 016080	13,0	-0,098
14/02/2012	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	7,0	-0,103
15/02/2012	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	5,5	-0,088
16/02/2012	CAL02 → CAL2-1 → CAL2-2 → CAL03 → CAL04	5,5	-0,101

3.2.4 - A correção do nivelamento (Tilt)

A qualidade das observações depende, obrigatoriamente, do gravímetro e de como ele é usado. O nivelamento do gravímetro é o início primordial para se obter observações de qualidade. Os gravímetros CG5 possuem um tripé próprio, fornecido pelo fabricante, que é obrigatório para iniciar as operações com o instrumento. Segundo o manual do instrumento (Scintrex, 2010), inicia-se o nivelamento pelo eixo Y, que é representado pelo calante frontal, e depois o eixo X. No sistema interno ao CG5, existe uma opção para corrigir automaticamente esse efeito (Fig. 3.1), se selecionada. Quando o gravímetro CG5 encontra-se em perfeitas condições de nivelamento, aparece um ícone ilustrando essa informação, ou seja, uma “carinha” (Fig.3.3).

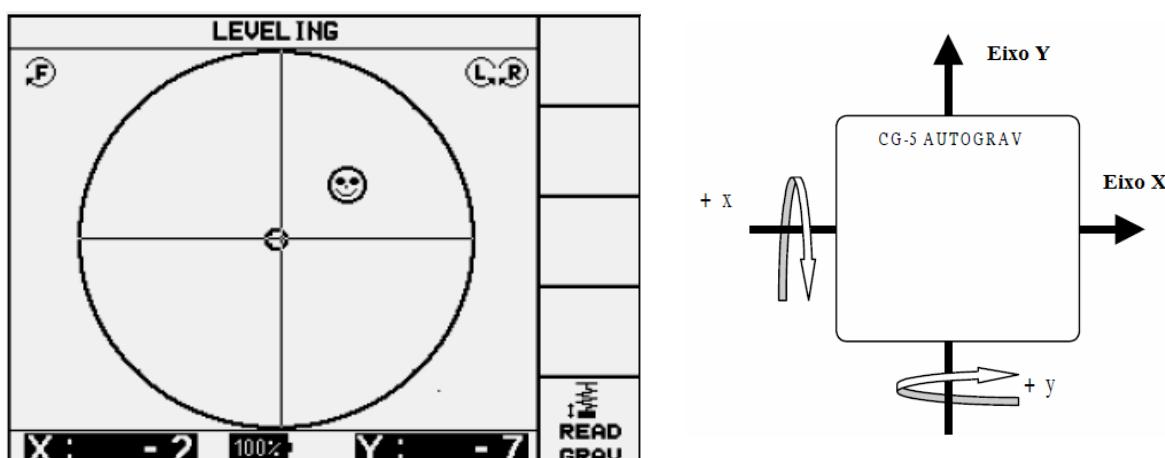


Figura 3.3 Os sentidos, que o operador tem que girar os calantes, são informados na parte superior da tela e o ícone representando um sorriso informa que o gravímetro está nivelado.

3.2.5 - A correção do filtro sísmico (Seismic filter)

É uma opção que o fabricante do gravímetro CG5 fornece aos operadores. A correção do filtro sísmico foi aprimorada através de estudos anteriores, que foram repassados para o fabricante, para reduzir os ruídos sísmicos nas medidas gravimétricas (Scintrex, 2010, p.A-12). Ao ser selecionado o filtro sísmico, a rejeição de uma amostra é aumentada de 4 desvios padrão para 6 desvios padrão. A razão para aumentar o valor da rejeição é que, durante um abalo, o nível de ruídos sísmico varia muito. Toda a campanha de medição com os gravímetros CG5, na LC ON-AN, a opção do filtro sísmico foi selecionada, como mostra a figura 3.1.

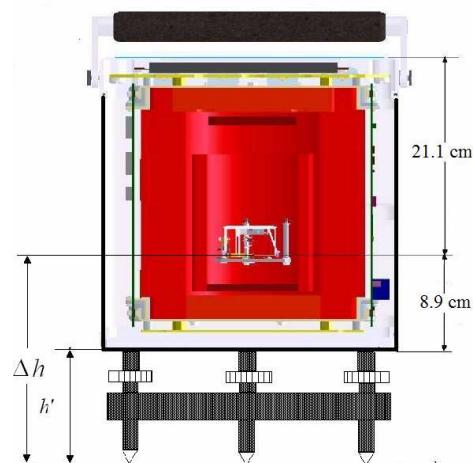
3.2.6 – A correção da elevação

Para iniciar um trabalho geofísico, com o uso do gravímetro CG5, é indispensável o uso do tripé (Fig.3.4(a)). O sensor do gravímetro fica numa distância vertical da estação gravimétrica durante as medidas (Δh) (Fig.3.4(b)) (Scintrex, 2010, p.1-8, Lederer, 2009). Esta distância é típica para cada gravímetro diferencial. Então, esta elevação tem que ser corrigida das medidas feitas com este instrumento. O gradiente vertical da gravidade de cada estação gravimétrica da LC ON-AN e a altura h' foram medidos para realizar esta correção de elevação (CE), que é dada por:

$$CE = \text{Gradiente} \times \Delta h \quad (3.2)$$



(a)



(b)

(Berquó, 2012)

Figura 3.4 (a) O gravímetro CG5, em operação, na estação gravimétrica CAL-05 e; (b) um esquema do gravímetro CG5 com suas distâncias especificadas.

O gravímetro CG5-839 foi utilizado para medir os gradientes verticais da gravidade nas estações da LC ON-AN. À distância, entre uma medida sobre a estação e outra acima desta foi de 1 metro, aproximadamente. Este procedimento foi realizado no sistema de ida-e-volta totalizando 12 medições do gradiente vertical da gravidade. Cada estação gravimétrica teve o seu valor médio do gradiente vertical calculado e foi inserido na Eq.(3.2).

Os valores da altura h' são medidos pelo operador antes de iniciar as medidas. A tabela 3.7 mostra os valores médios dos gradientes verticais medidos nas estações da LC ON-AN, bem como as correções devidas às alturas dos instrumentos. Ao realizar as medidas dos gradientes verticais da gravidade (Fig.3.5(b)) o instrumento ficou a uma altura da estação gravimétrica (Fig.3.5(a)), onde a altura H' foi medida pelo operador. A não aplicação dessa correção de elevação, em uma medida, acarretará um erro que está acima da precisão do instrumento (Lederer, 2009). Com isso, é necessária a correção deste efeito para ter uma qualidade de observação gravimétrica na ordem do micragal.

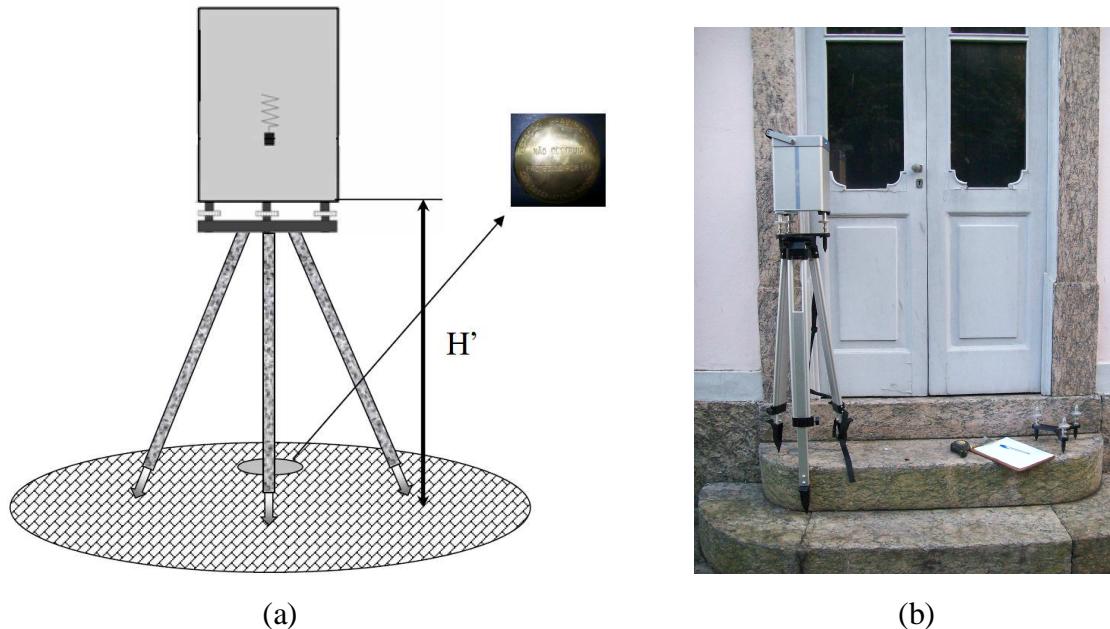


Figura 3.5 (a) Esquema das medidas do gradiente vertical da gravidade; (b) Medição do gradiente vertical da gravidade na estação 016080.

Tabela 3.7 Os gradientes e as correções devido às alturas dos instrumentos em relação às estações gravimétricas.

Número de ordem	Estações gravimétricas	Gradientes (mGal/m)	Δh (m)	Correções (CE) (mGal)
1	016080	-0,3064	0,264	-0,081
2	CAL1-1	-0,2505	0,262	-0,066
3	CAL1-2	-0,3204	0,263	-0,084

Número de ordem	Estações gravimétricas	Gradientes (mGal/m)	Δh (m)	Correções (CE) (mGal)
4	CAL1-3	-0,2860	0,251	-0,072
5	CAL02	-0,2935	0,262	-0,077
6	CAL2-1	-0,2946	0,274	-0,081
7	CAL2-2	-0,2711	0,269	-0,073
8	CAL03	-0,2862	0,262	-0,075
9	CAL04	-0,2732	0,262	-0,072
10	CAL4-2	-0,3380	0,254	-0,086
11	CAL4-4	-0,3018	0,262	-0,079
12	CAL4-5	-0,2828	0,253	-0,072
13	CAL05	-0,3239	0,262	-0,085

3.2.7 - As correções não consideradas na Pesquisa

As variações de pressão, temperatura, magnetização, massas de água subterrâneas e a correção de terreno não foram consideradas neste trabalho, pelas razões seguintes:

- (i) Os modernos gravímetros CG5 e os gravímetros LCR possuem dispositivo de compensação da variação da pressão interna e são selados numa câmera de vácuo para reduzir os efeitos da variação na pressão atmosférica;
- (ii) As leituras instrumentais dos gravímetros LCR e dos CG5 não sofrem correções de temperatura, já que os aparelhos possuem controle termostático, que mantém a temperatura estável na câmara do sensor.
- (iii) Para o gravímetro LCR, todo material metálico componente do gravímetro é submetido à desmagnetização durante a sua fabricação. Adicionalmente, os sistemas elásticos metálicos são providos de uma blindagem magnética. Sendo baseado em um sensor de quartzo fundido, o CG-5 é insensível a fortes variações magnéticas. ; e
- (iv) As variações das massas referentes aos lençóis d'água subterrâneos não foram consideradas pela dificuldade de se obter observações adequadas à determinação desta influência nas variações das medidas relativas de gravidade nos diferentes locais de observação.

3.3 – O valor da leitura em cada estação gravimétrica

A figura 3.6 representa um circuito de ida-e-volta que foi desenvolvido para analisar as observações gravimétricas dos gravímetros CG5 na LC ON-NA. A deriva estática foi realizada porque o gravímetro CG5 possui um deriva instrumental alta e para evitar que algum percurso de ida ou volta fosse comprometido.

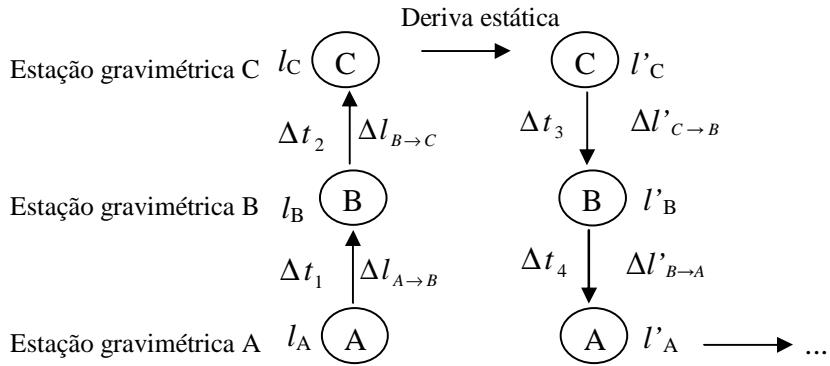


Figura 3.6 Exemplo com três estações gravimétricas utilizado na LC ON-NA para analisar as observações gravimétricas oriundas do gravímetro CG5.

Tomando o exemplo do intervalo de gravidade $A \rightarrow B$, a média dos intervalos de gravidade ponderados com o inverso do tempo Δt_i é calculada da seguinte forma:

$$\overline{\Delta l}_{A \rightarrow B} = \frac{\sum_i \frac{|\Delta l_{A \rightarrow B}|}{\Delta t_i}}{\sum_i \frac{1}{\Delta t_i}}, \quad (3.3)$$

Essa expressão é análoga para os outros intervalos de gravidade. Os critérios de rejeições são aplicados para todos os respectivos intervalos de gravidade da seguinte forma:

$$|\Delta l_{i \rightarrow j} - \overline{\Delta l}_{i \rightarrow j}| \leq 0,050 \quad (3.4)$$

$$\Delta t_{i \rightarrow j} \leq 24 \text{ horas} \quad (3.5)$$

Caso a diferença não satisfaça as Eqs.(3.4) e (3.5), o intervalo de gravidade é rejeitado e uma nova média para $\overline{\Delta l}_{i \rightarrow j}$ é calculada para o mesmo par de estações gravimétricas, até que todas as observações satisfaçam as Eqs.(3.4) e (3.5).

Para valor da leitura instrumental na estação gravimétrica origem de um intervalo de gravidade foi utilizada a média aritmética das leituras instrumentais obtidas nesta estação. O

valor da leitura instrumental da segunda estação gravimétrica é obtido somando-se ao valor da leitura instrumental da primeira estação gravimétrica o valor de $\bar{\Delta}l_{i \rightarrow j}$.

3.4 – As ponderações das grandezas envolvidas

Segundo Gamael (1994), é de grande importância para o ajustamento estimar as ponderações das grandezas envolvidas para a formação da matriz dos pesos. Muitas vezes, uma escolha não adequada, que não condiz com a realidade das grandezas, pode prejudicar o ajustamento, superestimando ou subestimando os parâmetros a determinar (Farret *et al*, 2006). Geralmente as covariâncias entre as grandezas observáveis são admitidas nulas e, consequentemente, a matriz dos pesos é a diagonal formada apenas em função das variâncias. Usou-se essa suposição neste trabalho de doutorado. Logo a matriz dos pesos das observações será:

$$P = \sigma_o^2 \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & P_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

onde P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são os pesos associados as grandezas observáveis no ajustamento.

Neste trabalho, o método dos mínimos quadrados foi utilizado no ajustamento da RGFB para extrair um resultado confiável para as grandezas observáveis e para os parâmetros a serem estimados. Para fornecer esta unicidade utilizando a variância *a priori* igual a 1mGal^2 , as ponderações foram:

(i) as leituras instrumentais são ponderadas com o inverso de suas variâncias multiplicadas pelo número de observações realizadas no intervalo da gravidade separadamente para cada gravímetro, onde o desvio padrão adotado foi de 0,026 UI para os gravímetros LCR (estimado pelas equações de condição) e de 0,010 UI para os gravímetros CG5 (estimado pelo erro quadrático médio);

(ii) os coeficientes de calibração são ponderados com o inverso de suas variâncias, onde o desvio padrão foi de 10^{-5} mGal/UI, no modelo matemático D&E; e

(iii) Os valores de gravidade absolutos são ponderados de acordo com o inverso de suas variâncias. Estes valores foram extraídos da Tab.2.2.

(iv) Os valores dos fatores de conversão ao datum gravimétrico local por intervalo são ponderados de acordo com o inverso de suas variâncias, onde o desvio padrão foi de 10^{-4} .

Capítulo 4

Os modelos matemáticos usados no ajustamento da RGFB

4.1 – Considerações Físicas

Segundo Escobar (1986), as observações gravimétricas estão sujeitas a alguns efeitos sistemáticos que devem ser considerados no modelo matemático, corrigidos antes do ajustamento das observações, ou evitados nos processos de construção e operação do instrumento.

Em alguns modelos matemáticos, costuma-se utilizar um parâmetro no ajustamento para ser estimado na solução do modelo matemático, por exemplo, a deriva instrumental (Rosier, 1979).

A deriva instrumental depende das condições ambientais a que o gravímetro está sendo submetido. Então, recomenda-se corrigir esse efeito sistemático antes do ajustamento com uma taxa de deriva para cada trecho a que o gravímetro foi submetido, e não com um valor fixo para a taxa de deriva em todos os intervalos da gravidade, porque as condições ambientais submetidas são diferentes desde a saída do instrumento até o local a ser observado. Outro efeito sistemático que deve ser corrigido antes do ajustamento é o efeito da atração luni-solar, que é função das coordenadas da estação gravimétrica e dos instantes que as observações foram medidas.

Nos gravímetros digitais CG5, os efeitos de temperatura, magnetização, pressão atmosférica e nivelamento são corrigidos automaticamente pelo sistema eletrônico do instrumento a partir de dispositivos compensadores ou eliminadores. Não podemos esquecer também outros efeitos sistemáticos que estão presente nas observações. Dentre esses, a conversão de datum gravimétrico, cujos parâmetros são inseridos no modelo matemático e estimados na solução final do ajustamento das observações. Um dos objetivos principais desta tese é investigar se apenas um parâmetro linear para os gravímetros CG5, numa amplitude de gravidade de 1919 mGal, é suficiente ou não.

4.2 – O método combinado

Geralmente, as grandezas físicas ou geométricas que se pretende determinar não são diretamente observáveis são determinadas a partir de um modelo matemático que expressa a relação funcional entre estas grandezas e as grandezas observáveis (Gemael, 1994). Este modelo matemático pode ser:

$$\vec{f}(\vec{x}_a, \vec{l}_a) = 0, \quad (4.1)$$

onde \vec{x}_a representa o vetor dos parâmetros ajustados e \vec{l}_a representa o vetor das observações ajustadas. Esses vetores podem ser decompostos por uma soma vetorial da seguinte forma:

$$\vec{x}_a = \vec{x}_o + \vec{x}, \quad (4.2)$$

$$\vec{l}_a = \vec{l}_b + \vec{v}, \quad (4.3)$$

onde \vec{x}_o representa o vetor dos parâmetros aproximados; \vec{l}_b representa o vetor dos valores observados; \vec{x} representa o vetor de correção referente aos valores aproximados e \vec{v} representa o vetor dos resíduos. Assim, a Eq.(4.1) assume a seguinte forma:

$$\vec{f}(\vec{x}_o + \vec{x}, \vec{l}_b + \vec{v}) = 0, \quad (4.4)$$

onde $\vec{f} = (\vec{f}_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$, denota o vetor das funções que associam \vec{x}_a e \vec{l}_a , podendo ser linear ou não, sendo m a dimensão do modelo, igual ao número de equações. No caso de modelo não linear, este deve ser linearizado a fim de que se possa obter a solução do sistema pelo MMQ (Dalmolin, 2002). Com este objetivo, o modelo é aproximado por série de Taylor, ou seja:

$$\vec{f}(\vec{x}_a, \vec{l}_a) = \vec{f}(\vec{x}_o, \vec{l}_b) + \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}_a} \right|_{\substack{\vec{x}_a = \vec{x}_o \\ \vec{l}_a = \vec{l}_b}} (\vec{x}_a - \vec{x}_o) + \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{l}_a} \right|_{\substack{\vec{x}_a = \vec{x}_o \\ \vec{l}_a = \vec{l}_b}} (\vec{l}_a - \vec{l}_b) = 0, \quad (4.5)$$

Fazendo

$$A = \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}_a} \right|_{\substack{\vec{x}_a = \vec{x}_o \\ \vec{l}_a = \vec{l}_b}}, \quad B = \left. \frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{l}_a} \right|_{\substack{\vec{x}_a = \vec{x}_o \\ \vec{l}_a = \vec{l}_b}}, \quad \vec{x} = \vec{x}_a - \vec{x}_o, \quad \vec{v} = \vec{l}_a - \vec{l}_b \text{ e } \vec{w} = \vec{f}(\vec{x}_o, \vec{l}_b), \text{ tem-se}$$

$$A\vec{x} + B\vec{v} + \vec{w} = 0, \quad (4.6)$$

onde o vetor \vec{w} , é expresso em função de valores conhecidos, e recebe a designação de vetor erro de fechamento com dimensão ($m \times 1$); A é uma matriz ($m \times r$) das derivadas parciais de \vec{f} em relação aos "r" parâmetros e B é uma matriz ($m \times n$) das derivadas parciais de \vec{f} em relação aos "n" valores observados.

O sistema que é representado pela Eq.(4.6), cuja solução pelo método dos mínimos quadrados, fornece os melhores estimadores para as grandezas envolvidas, com base na seguinte condição:

$$\Phi = \vec{v}^T P \vec{v} - 2\vec{k}^T (A\vec{x} + B\vec{v} + \vec{w}) = \text{mínimo}, \quad (4.7)$$

onde \vec{k} é representa o vetor dos coeficientes lagrangianos ou correlatos. Derivando parcialmente Φ em relação à \vec{x} , \vec{v} , e \vec{k} , encontram-se as seguintes expressões:

$$\vec{x} = -(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} \vec{w}, \quad (4.8)$$

$$\vec{v} = P^{-1} B^T \vec{k}, \quad (4.9)$$

$$\vec{k} = -M^{-1} (A\vec{x} + \vec{w}), \quad (4.10)$$

onde: $M = B P^{-1} B^T$.

Com as Eqs.(4.8), (4.9) e (4.10) permitem obter os valores ajustados para os parâmetros, \vec{x}_a , e para as grandezas observáveis, \vec{l}_a .

4.3 – O método combinado com injunções relativas

Muitas vezes a solução do modelo requer o conhecimento de informações adicionais, tais como os valores de gravidade de referência. Esses valores serão introduzidos como injunções (ou vínculos) relativas (Escobar, 1986, Escobar, p. 73, 1991), sendo ponderadas de acordo com o inverso da estimativa de suas variâncias, através de um modelo injuntivo adicional. Este modelo adicional é representado por:

$$g - \bar{g} = 0, \quad (4.11)$$

onde \bar{g} é representa os valores da gravidade de referência e g são os valores da gravidade aproximados para estas estações gravimétricas de referência. Então, o modelo matemático para as injunções relativas é:

$$\vec{f}(\vec{x}_a, \vec{l}'_a) = 0, \quad (4.12)$$

onde \vec{f}' é o vetor das funções de injunções relativas, e $\vec{l}'_a = \{\vec{g}_i\}$; $i = 1 \dots s$, é o vetor das observações ajustadas relacionado as injunções, onde s é o número total de estações gravimétricas de referência. A forma linearizada é dada por:

$$\bar{\Phi} = \vec{v}^T P \vec{v} + \vec{v}'^T P' \vec{v}' - 2k^T (A \vec{x} + B \vec{v} + \vec{w}) - 2k'^T (A' \vec{x} + B' \vec{v}' + \vec{w}') \quad (4.13)$$

onde A' é a matriz das derivadas parciais de \vec{f}' em função dos parâmetros, \vec{x}_a , B' é a matriz das derivadas parciais de \vec{f}' em função das observações ajustadas relacionadas as injunções, \vec{l}'_a . Igualando a zero as derivadas parciais de $\bar{\Phi}$ em relação à $\vec{x}, \vec{v}, \vec{v}', \vec{k}$ e \vec{k}' , teremos as seguintes expressões:

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \vec{x}} = A^T \vec{k} + A'^T \vec{k}' = 0, \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \vec{v}} = P \vec{v} - B^T \vec{k} = 0, \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \vec{v}'} = P' \vec{v}' - B'^T \vec{k}' = 0, \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \vec{k}} = A \vec{x} + B \vec{v} + \vec{w} = 0, \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \vec{k}'} = A' \vec{x} + B' \vec{v}' + \vec{w}' = 0, \quad (4.18)$$

A partir da Eq.(4.15), encontraremos uma expressão para o vetor dos resíduos \vec{v} e substituindo na Eq.(4.17) teremos uma expressão para o vetor \vec{k} :

$$\vec{k} = -M^{-1}(A \vec{x} + \vec{w}), \quad (4.19)$$

Utilizando a Eq.(4.16), encontraremos uma expressão para o vetor \vec{v}' :

$$\vec{v}' = P'^{-1} B'^T \vec{k}', \quad (4.20)$$

Substituindo a Eq.(4.20) na Eq.(4.18), encontraremos uma expressão para o vetor \vec{k}' :

$$\vec{k}' = -M'^{-1}(A' \vec{x} + \vec{w}'), \quad (4.21)$$

onde: $M' = B' P'^{-1} B'^T$

Substituindo as Eqs.(4.19) e (4.21) na Eq.(4.14) teremos:

$$\vec{x} = -(A^T M^{-1} A + A'^T M'^{-1} A')^{-1} (A^T M^{-1} \vec{w} + A'^T M'^{-1} \vec{w}'), \quad (4.22)$$

onde $\vec{w}' = g_i^0 - \bar{g}_i$. Adotando-se para valores aproximados dos valores de gravidade absolutos os próprios valores observados e sabendo-se que $B' = -I$, consequentemente, $\vec{w}' = 0$ e a Eq.(4.22) torna-se:

$$\vec{x} = -(A^T M^{-1} A + A'^T P' A')^{-1} A^T M^{-1} \vec{w} \quad (4.23)$$

4.4 – As incertezas dos parâmetros ajustados

A matriz variância-covariância utilizada para estimar as precisões dos parâmetros ajustados (Escobar, p. 66, 1991) é dada por:

$$\sum_X = \hat{\sigma}_o^2 (A^T M^{-1} A + A'^T P' A')^{-1}, \quad (4.24)$$

onde $\hat{\sigma}_o^2$ é a variância da observação de peso unitário estimada *a posteriori*, dada por:

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\vec{v}^T P \vec{v} + \vec{v}'^T P' \vec{v}'}{n + m - r} \quad (4.25)$$

4.5 – O modelo matemático de Dias e Escobar (2001)

Tendo duas estações gravimétricas P e Q arbitrárias com valores da gravidade absolutos conhecidos g_p e g_q , e realizando-se medidas com gravímetros diferenciais nestas mesmas estações têm-se dois valores de leituras instrumentais observados, designados por l_p e l_q , respectivamente. Convertendo essas leituras instrumentais, em mGal, corrigidas da maré e da deriva instrumental, l'_p e l'_q , e comparando as diferenças de valores tem-se:

$$g_q - g_p \neq l'_q - l'_p, \quad (4.26)$$

Além dos erros naturais de observação, esta diferença está associada à diferença entre o datum usado nas observações absolutas e aquele em relação ao qual os instrumentos foram calibrados. Assim, os coeficientes das funções de calibração que não estão corrigindo

devidamente as leituras instrumentais brutas, logo esses coeficientes devem ser verificados num processo de aferição. O modelo matemático normalmente utilizado é:

$$g_q - g_p = k_r (l'_q - l'_p), \quad (4.27)$$

onde k_r é o fator linear de escala do gravímetro de série r , que compatibiliza a escala própria do instrumento com a escala do referencial gravimétrico utilizado, neste caso as estações absolutas.

O modelo matemático D&E (Dias, 1997) é um exemplo da utilização desse modelo linear. Este modelo matemático foi desenvolvido com base na transformação de leituras instrumentais, em UI para mGal, de qualquer gravímetro diferencial LCR, modelo G. Porém, pode ser utilizado para qualquer gravímetro diferencial.

Cada gravímetro diferencial LCR possui uma função de calibração representada por uma tabela de coeficientes de escala para intervalos de 100 unidades de leituras, que é fornecida pelo próprio fabricante. A Tab. 4.1 ilustra uma parte da tabela do gravímetro diferencial LCR, modelo G e número de série 622 com uma amplitude de 7000 mGal, fornecida pelo fabricante.

Tabela 4.1 Parte da tabela do gravímetro LCR, modelo G622, fornecida pelo fabricante.

Leitura do dial	Valor da leitura em mGal	Coeficientes da função de calibração
0	0	1,01862
100	101,86	1,01862
200	203,72	1,01862
300	305,59	1,01862
400	407,45	1,01863
....

A relação entre a leitura do dial e a leitura em mGal:

$$\begin{aligned} l'_o &= 0 \\ l'_1 &= 100\alpha_o + l'_o \\ l'_2 &= 100(\alpha_o + \alpha_1) + l'_o \\ l'_3 &= 100(\alpha_o + \alpha_1 + \alpha_2) + l'_o \\ l'_4 &= 100(\alpha_o + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + l'_o \\ &\dots \end{aligned} \quad (4.28)$$

onde α_i é o coeficiente da função de calibração para o intervalo discretizado fornecido pelo fabricante e l'_n é a leitura instrumental, em mGal.

A Eq.(4.28) pode ser representada pela seguinte expressão:

$$l_n' = 100 \left(\sum_{m=0}^{n-1} \alpha_m \right) + l_o', \quad (4.29)$$

A Eq.(4.29) nos mostra à relação entre uma leitura instrumental, l_n' , em UI, que é múltipla de 100, sendo transformada em valor de mGal. Agora, para o caso em que as leituras instrumentais não são múltiplas de 100 é:

$$l_n' = 100 \left(\sum_{m=0}^{n-1} \alpha_m \right) + l_o' + \left(l_n - 100 \Im \left(\frac{l_n}{100} \right) \right) \alpha_n, \quad (4.30)$$

onde a função \Im ao ser aplicada sobre um número real fornecerá um número inteiro;

As funções I e J são definidas como: $I = \Im \left(\frac{l_p}{100} \right)$ e $J = \Im \left(\frac{l_q}{100} \right)$, para duas estações

gravimétricas arbitrárias p e q , respectivamente, e δ é o intervalo discretizado que é igual a 100 UI.

$$l_p' = \delta \left(\sum_{m=0}^{I-1} \alpha_m \right) + l_o' + (l_p - \delta I) \alpha_I, \quad (4.31)$$

$$l_q' = \delta \left(\sum_{m=0}^{J-1} \alpha_m \right) + l_o' + (l_q - \delta J) \alpha_J, \quad (4.32)$$

Ao substituir a Eqs. (4.31) e (4.32) na Eq.(4.27) teremos o modelo matemático D&E, que envolve as leituras instrumentais (l), valores de gravidade (g), coeficientes da função de calibração (α) e os fatores lineares residuais de escala dos gravímetros utilizados (k), que para um determinado gravímetro (r) é definido como:

$$g_q - g_p + k_r \left(l_p r \alpha_I - l_q r \alpha_J - \delta I r \alpha_I + \delta J r \alpha_J + \delta \sum_{m=0}^{I-1} r \alpha_m - \delta \sum_{m=0}^{J-1} r \alpha_m \right) = 0 \quad (4.33)$$

As grandezas observáveis são as leituras instrumentais corrigidas da deriva instrumental e maré luni-solar e os coeficientes das funções de calibração dos gravímetros usados nas medições (α). Os parâmetros incógnitos a serem determinados em ajustamento pelo método dos mínimos quadrados são os valores de gravidade e os fatores lineares de escala dos gravímetros (k_r). A função de calibração do gravímetro CG5 é linear em todo o

alcance da escala, portanto a conversão de UI para mGal é feita por um único fator de escala, determinado pelo fabricante, e automaticamente corrigido pelo sistema residente no instrumento. Assim, as leituras fornecidas pelo instrumento já são expressas em mGal. Entretanto, para efeito de aferição do instrumento, é importante verificar a coerência deste com o datum gravimétrico local. Esta verificação foi feita utilizando-se o modelo D&E e, principalmente, seu aprimoramento, para cujas aplicações foi construída a tabela 4.2, onde a amplitude de escala é discretizada em intervalos de 100 UI, para os quais os fatores de conversão mGal/UI iniciais foram igualados à unidade.

Tabela 4.2 Parte da tabela construída para os gravímetros digitais CG5.

Leituras instrumentais (UI)	Leituras instrumentais (mGal)	Coeficientes para o intervalo (α)
0	0	1.00000
100	100	1.00000
200	200	1.00000
300	300	1.00000
400	400	1.00000
...

4.6 – Formulação do modelo matemático proposto

Uma vez concluído o processo de aplicação do modelo D&E ao ajustamento de rede, resta à meta da adequação deste modelo aos gravímetros mais modernos, que apresentam resolução de leitura de microgal, como o Scintrex CG5.

Um aspecto a ser investigado refere-se ao modelo de correção ao datum gravimétrico local, que normalmente é considerado através de uma função linear, representada por um fator de escala, que se aplica, indistintamente, a toda a amplitude da escala do instrumento. Infere-se que para uma rede de pequena amplitude de gravidade a falta de linearidade deve ser negligenciável. Entretanto, considerando-se a precisão do microgal, quão pequena deve ser esta amplitude para que esta negligência seja válida?

Para verificar a linearidade da correção ao datum, foi feita uma simples adaptação ao modelo D&E, simplesmente remove-se o parâmetro k_r , ou seja, igualando-o a unidade, e considera-se um fator de conversão ao datum por intervalo ($_{r_i} \kappa_i$), para cada gravímetro (r), que passará a absorver as correções dos efeitos da mudança de datum. A comparação dos valores dos fatores lineares de escala ajustados pelo modelo D&E com os valores ajustados

destes fatores de conversão ao datum por intervalo fornecerá erros que uma leitura poderá estar sendo submetida caso ocorra alguma medição nesse intervalo. Deste modo, é possível verificar se a variação destes fatores é, ou não, compatível com a resolução ao microgal.

$$g_q - g_p + l_p \cdot {}_r\alpha'_I - l_q \cdot {}_r\alpha'_J - \delta I \cdot {}_r\alpha'_I + \delta J \cdot {}_r\alpha'_J + \delta \sum_{m=0}^{I-1} {}_r\alpha'_m - \delta \sum_{m=0}^{J-1} {}_r\alpha'_m = 0, \quad (4.34)$$

Os coeficientes da função de calibração podem ser tratados da seguinte forma:

$${}_r\alpha'_i = {}_r\kappa_i \cdot {}_r\alpha_i, \quad (4.35)$$

Os valores de ${}_r\alpha_i$ serão tratados como constantes, ou seja, serão os próprios valores da tabela do gravímetro que são fornecidos pelo fabricante. Os valores aproximados para ${}_r\kappa_i$ vêm da seguinte igualdade:

$$k_r^a \cdot {}_r\alpha_i = {}_r\kappa_i \cdot {}_r\alpha_i, \quad (4.36)$$

Consequentemente:

$${}_r\kappa_i = k_r^a, \quad (4.37)$$

onde k_r^a é o fator linear de escala para o gravímetro r , estimado em um ajustamento prévio com base no modelo D&E.

Os fatores de conversão ao datum por intervalo foram inclusos com injunções relativas por um modelo adicional que é:

$$\kappa - \bar{\kappa} = 0, \quad (4.38)$$

Na Eq.(4.34), as grandezas observáveis e incógnitas foram as seguintes:

(i) Grandezas observáveis: $\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ \dots \\ l_\gamma \end{bmatrix}$	(ii) Grandezas incógnitas: $\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \dots \\ g_\beta \\ {}_1\kappa_1 \\ \dots \\ {}_2\kappa_1 \\ \dots \\ {}_r\kappa_z \end{bmatrix}$
--	---

onde: γ é o número de leituras instrumentais ($\gamma = 3478$); β é o número de estações gravimétricas ($\beta = 534$) e z é o número de fatores de conversão ao datum gravimétrico por intervalo ($z = 202$).

4.6.1 – A matriz A dos coeficientes dos parâmetros

Os valores de gravidade e as funções de conversão ao datum local são parâmetros que serão estimadas no ajustamento. Logo, a dimensão da matriz A é de 1739 linhas por 736 colunas, onde o número de parâmetros será igual a 534, referente às estações, somado com 202, referente aos fatores de conversão ao datum gravimétrico por intervalo. Com isso, esta matriz é definida da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial g_1} & \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial g_2} & \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial g_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial g_\beta} & \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial_{1\kappa_1}} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial_{2\kappa_1}} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_1}{\partial_r \kappa_\epsilon} \\ \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial g_1} & \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial g_2} & \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial g_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial g_\beta} & \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial_{1\kappa_1}} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial_{2\kappa_1}} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_2}{\partial_r \kappa_\epsilon} \\ \dots & & & & & & & & & & \\ \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial g_1} & \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial g_2} & \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial g_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial g_\beta} & \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial_{1\kappa_1}} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial_{2\kappa_1}} & \cdots & \frac{\partial \vec{f}_m}{\partial_r \kappa_\epsilon} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Percorrendo um intervalo de gravidade arbitrário, indo da estação gravimétrica j para a estação gravimétrica i , as derivadas parciais têm os seguintes valores:

(i) Em relação aos valores de gravidade:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial g_i} = \begin{cases} i = p \rightarrow \frac{\partial \vec{f}}{\partial g_p} = -1 \\ i \neq p \text{ e } i \neq q \rightarrow \frac{\partial \vec{f}}{\partial g_i} = 0 \\ i = q \rightarrow \frac{\partial \vec{f}}{\partial g_q} = 1 \end{cases} \quad (4.40)$$

(ii) Em relação aos fatores de conversão ao datum local por intervalo:

• (1) Com $J > I$ e $i = r$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{f}}{\partial_{r\kappa_J}} &= -l_{q\ r}\alpha_J + 100J\ _r\alpha_J \\ &\text{e} \\ \frac{\partial \vec{f}}{\partial_{r\kappa_I}} &= l_{p\ r}\alpha_I - 100I\ _r\alpha_I - 100\ _r\alpha_I \end{aligned} \quad (4.41)$$

(1.2) Para índices φ contidos entre I e J , têm-se:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_\varphi} = -100 {}_r \alpha_\varphi \quad (4.42)$$

(1.3) Para $i \neq r$, tem-se:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_m} = 0 \quad (4.43)$$

• (2) Com $I > J$ e $i = r$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_J} &= -l_q {}_r \alpha_J + 100 J {}_r \alpha_J + 100 {}_r \alpha_J \\ &\text{e} \\ \frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_I} &= l_p {}_r \alpha_I - 100 I {}_r \alpha_I \end{aligned} \quad (4.44)$$

(2.2) Para índices φ contidos entre I e J , têm-se:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_\varphi} = 100 {}_r \alpha_\varphi \quad (4.45)$$

(2.3) Para $i \neq r$, tem-se:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_m} = 0 \quad (4.46)$$

• (3) Agora vamos analisar para $I = J$;

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_\varphi} = (l_p - l_q) {}_r \alpha_J \quad (4.47)$$

e para $\varphi \neq J$ e $\varphi \neq I$, tem-se:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial_r \kappa_\varphi} = 0 \quad (4.48)$$

para qualquer i .

4.6.2 – A matriz B dos coeficientes das observações

Cada intervalo da gravidade distinto corresponde a uma equação no ajustamento, tendo as duas leituras instrumentais, corrigidas da maré luni-solar e da deriva instrumental, como variáveis independentes. As leituras instrumentais são grandezas observáveis no

ajustamento. Logo, o número de observações será igual ao dobro do número de intervalos de gravidade distintos. Com isso, a dimensão da matriz B é de 1739 linhas por 3478 colunas.

Para um intervalo de gravidade arbitrário com o sentido de p para q , tem-se:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial l_i} = \begin{cases} i = p \rightarrow \frac{\partial \vec{f}}{\partial l_p} = k_r^a \alpha_i \\ i = q \rightarrow \frac{\partial \vec{f}}{\partial l_q} = -k_r^a \alpha_i \\ i \neq p, i \neq q \rightarrow \frac{\partial \vec{f}}{\partial l_i} = 0 \end{cases} \quad (4.49)$$

4.6.3 – O vetor erro de fechamento

O modelo combinado com injunções relativas foi utilizado no ajustamento do acervo de dados da RGFB. Então, o vetor erro de fechamento para o modelo principal será:

$$\vec{w} = F(\vec{x}_o, \vec{l}_o) \quad (4.50)$$

A dimensão do vetor erro de fechamento é de 1739 linhas por 1 coluna. Para o modelo injuntivo, tendo uma equação para cada estação gravimétrica absoluta totalizando 11 equações.

$$\vec{w}' = F'(\vec{x}'_o, \vec{l}'_o) \quad (4.51)$$

onde \vec{x}_o e \vec{x}'_o são os vetores para os valores iniciais dos parâmetros; \vec{l}_o e \vec{l}'_o são os vetores para as observações.

Capítulo 5

Resultados e discussões

5.1 – Introdução

Neste capítulo, realiza-se o ajustamento da RGFB (Escobar, 1980) utilizando o método combinado com injunções relativas com o modelo matemático D&E e o seu aprimoramento. O ajustamento permite avaliar a qualidade dos dados gravimétricos da RGFB e o comportamento dos modelos matemáticos. Os testes foram realizados nas seguintes condições: (i) utilização de um acervo maior de dados como é esse que tem uma amplitude de 1919 mGal; (ii) utilização de 21 gravímetros diferenciais; e (iii) Os intervalos de gravidade foram medidos, no mínimo, com dois destes instrumentos simultaneamente.

Uma vez concluído o processo de aplicação do modelo D&E ao ajustamento da RGFB, pode-se avaliar o comportamento deste modelo matemático e compará-lo com trabalhos anteriores, tendo como parâmetro os valores de gravidade e os fatores lineares de escala dos gravímetros. Esses fatores lineares de escala ajustados foram usados como valores aproximados para o aprimoramento do modelo D&E, que é um dos objetivos desta pesquisa. Um aspecto a ser investigado refere-se ao modelo de conversão ao datum gravimétrico local por intervalo, que normalmente é considerado através de uma função linear, representada por um fator linear de escala para cada gravímetro e que se aplica a toda amplitude da escala do instrumento. Para verificar a linearidade da correção ao datum, foi feita uma simples adaptação do modelo D&E, considerando este fator linear de escala igual à 1 ($k_r = 1$). Deste modo, os coeficientes passaram a absorver as correções dos efeitos da mudança de datum a partir de um fator de conversão ao datum gravimétrico por intervalo, como foi mencionado no capítulo 4. Então, é possível verificar se a variação destes fatores é ou não compatível com a resolução do microgal e se apenas um fator de escala é ou não suficiente para a amplitude da gravidade à RGFB.

5.2 – Aplicação do modelo matemático D&E

Para verificar o comportamento deste modelo matemático, avaliaram-se os resultados dos resíduos das leituras instrumentais, dos coeficientes das funções de calibração dos gravímetros, das correções dos valores de gravidade das estações gravimétricas, dos fatores lineares de escala dos gravímetros e a comparação entre as variâncias *a priori* e *a posteriori*. O método dos mínimos quadrados foi utilizado no ajustamento da RGFB para extrair um resultado confiável para as grandezas envolvidas no ajustamento. Para estimar o valor da variância *a posteriori* próximo da variância *a priori*, que foi tratada como 1mGal^2 , as seguintes ponderações foram efetuadas:

- i. As leituras instrumentais foram ponderadas com o inverso de suas variâncias multiplicadas pelo número de determinações realizado no intervalo de gravidade separadamente para cada gravímetro diferencial, onde os respectivos desvios padrão adotados para as leituras instrumentais foram, respectivamente, de 0,030 UI para as medidas com os gravímetros LCR e; 0,010 UI para as medidas com os gravímetros CG5. Este valor foi calculado a partir do erro quadrático médio;
- ii. Os coeficientes da função de calibração foram ponderados com o inverso de suas variâncias, com desvio padrão estimado em 10^{-5} mGal/UI ;
- iii. Os valores de gravidade absolutos foram ponderados com o inverso de suas variâncias, onde os valores dos desvios padrão foram extraídos da Tab2.2.

O valor estimado para a variância *a posteriori* foi igual a $1,014\text{ mGal}^2$. Segundo Oliveira e Damolin (2008), normalmente a variância *a posteriori* é superior à variância *a priori* porque pode ter erros inclusos nas observações. Como houve certa discrepância entre as variâncias, aplicou-se o teste global baseado na distribuição de chi-quadrado a um nível de significância de 5% (Tab.5.1) e a hipótese nula ($\sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$) não foi rejeitada, mostrando a coerência das ponderações usadas para as grandezas envolvidas no ajustamento.

Tabela 5.1 Critérios e valores usados no ajustamento e a aplicação do teste global com um nível de significância de 5%.

Critérios utilizados	Valores do ajustamento
Número de intervalos distintos	1739
Número de parâmetro	555 (534 estações + 21 gravímetros)
Grau de liberdade do ajustamento	1195
Variância <i>a priori</i>	1,000
Variância <i>a posteriori</i>	1,014
Qui-quadrado teórico	[1101,09 ; 1292,70]
Qui-quadrado calculado	1211,73

As estações gravimétricas de referência sofreram pequenas correções nos seus valores da gravidade iniciais. Estas correções situaram-se abaixo de dois desvios padrão estimadas inicialmente no ajustamento (Tab.5.2), mostrando uma qualidade muito boa das observações medidas com os gravímetros diferenciais.

Tabela 5.2 Valores absolutos da gravidade ajustados, suas correções e seus respectivos desvios padrão.

Código da estação	Localização das estações	Correções (μGal)	Valores de g (μGal)	σ (μGal)
IFE040	Sta Elena Uairen	3,2	977 822 087	10
IFE112	Teresina	-3,8	978 016 339	10
IFE122	Brasília	2,9	978 048 801	9
IFE132	Viçosa	0,9	978 460 231	9
IFE142	Vassouras	-3,3	978 637 578	9
IFE152	Vinhedo	-2,1	978 563 776	10
IFE162	Curitiba	1,7	978 760 389	9
IFE172	Santa Maria	-10,4	979 261 626	9
IFE212	Rivera	6,9	979 344 384	9
IFE222	Toledo	-1,8	979 715 853	9
IFE232	Paysandu	5,8	979 523 532	9

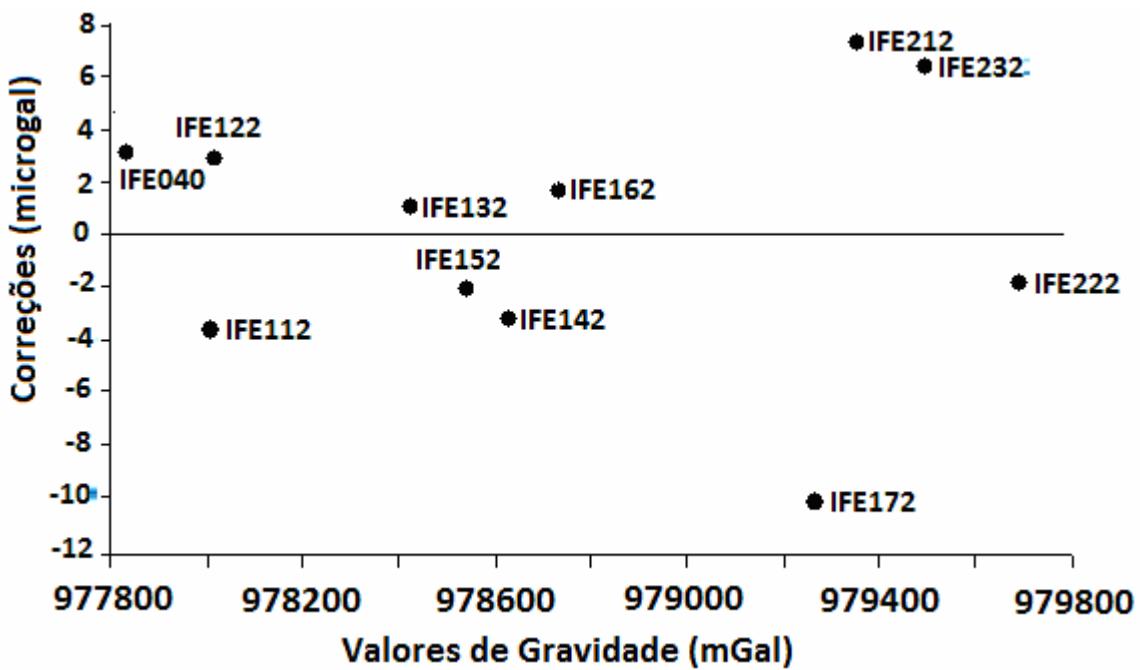


Figura 5.1 As correções das 11 estações absolutas. Pode-se visualizar que não há tendenciosidade nessas grandezas, uma vez que o somatório das correções é igual à zero.

O maior resíduo para as leituras instrumentais, corrigidas da maré luni-solar e da deriva instrumental, foi de 0,043 UI. Esse resíduo foi referente à leitura instrumental medida com o gravímetro LCR. Os resíduos das leituras instrumentais dos gravímetros CG5 ficaram entre $0,03 \times 10^{-3}$ até $17,7 \times 10^{-3}$ UI. Os valores de todos os resíduos ficaram abaixo de duas vezes o desvio padrão estimado inicialmente (0,060 UI para o LCR e 0,020 UI para os CG5) (Fig.5.2).

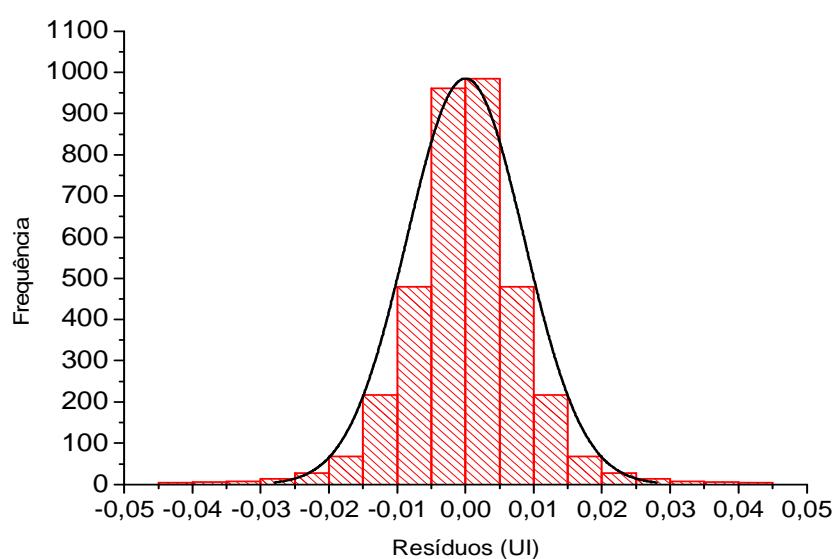


Figura 5.2 Histograma dos resíduos das leituras instrumentais. Em preto, a Gaussiana com o mesmo valor médio e desvio padrão: $0,000 \pm 0,009$ UI.

Os fatores lineares de escala dos gravímetros foram estimados como parâmetros no ajustamento. Esses valores apresentaram boa coerência com aqueles obtidos previamente por Dias e Escobar (2001) e Escobar (1996), apesar dos trabalhos anteriores envolverem quantidades de observações e de instrumentos inferiores ao atual (Tab.5.3). Os gravímetros LCR G257, G602 e G622 apresentaram os melhores indicadores de precisão dentre os gravímetros utilizados neste trabalho. Isto provavelmente deve ser consequência da grande utilização destes instrumentos na aquisição dos dados, totalizando 2120, 1082 e 863 intervalos de gravidade bons, respectivamente. Verifica-se que o gravímetro CG5, número de série 343, teve a melhor precisão $3,7 \times 10^{-5}$ com apenas 144 observações comparado com os números de medidas dos gravímetros LCR acima mostrando a excelente qualidade de suas observações.

Tabela 5.3 Os fatores lineares de escala ajustados e comparados com outros trabalhos.

Gravímetro	Trabalho atual		Dias e Escobar (2001)		Escobar <i>et al</i> (1996)	
	k	σ	k	σ	k	σ
LCR-011	0,998910	0,000045	-	-	0,999727	0,000030
LCR-013	0,998828	0,000088	0,998834	0,000077	-	-
LCR-041	0,999814	0,000048	-	-	-	-
LCR-061	1,000068	0,000036	1,000007	0,000004	-	-
LCR-190	0,999946	0,000122	-	-	-	-
LCR-194	1,000245	0,000105	-	-	-	-
LCR-231	1,000560	0,000118	-	-	-	-
LCR-257	1,000330	0,000029	1,000328	0,000034	1,000317	0,000021
LCR-372	1,000475	0,000071	-	-	1,000474	0,000056
LCR-454	1,000318	0,000042	-	-	1,000381	0,000044
LCR-602	1,000396	0,000030	1,000470	0,000036	1,000471	0,000026
LCR-613	0,999906	0,000046	-	-	0,999963	0,000056
LCR-622	1,000434	0,000030	1,000404	0,000037	1,000448	0,000027
LCR-628	1,000454	0,000053	-	-	1,000460	0,000056
LCR-674	1,000461	0,000042	1,000556	0,000042	1,000476	0,000030
LCR-703	1,000527	0,000083	-	-	-	-
CG5-308	1,001052	0,000043	-	-	-	-
CG5-343	1,000496	0,000037	-	-	-	-
CG5-347	1,000171	0,000043	-	-	-	-
CG5-600	0,999752	0,000042	-	-	-	-
CG5-839	0,999634	0,000038	-	-	-	-

O modelo matemático D&E também permite correção para os coeficientes da função de calibração dos gravímetros nas faixas de leituras utilizadas. Neste caso, o intervalo dos resíduos estimados foi de $-7,9 \times 10^{-11}$ mGal/UI até $6,9 \times 10^{-6}$ mGal/UI, que fica abaixo do desvio padrão estimado inicialmente no ajustamento. As Figs. 5.3 até 5.6 e as Tabs.5.4 até 5.7 apresentam os resíduos estimados para estes coeficientes, que também não apresentaram tendenciosidade. No apêndice II, os valores dos coeficientes da função de calibração para os demais gravímetros são apresentados.

Tabela 5.4 Os coeficientes da função de calibração do gravímetro LCR G061.

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR, G061

Número de coeficientes da função de calibração: 10			
Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1400	-0,00886	1,03760	1,03760
1500	-0,06664	1,03765	1,03765
1600	-0,11600	1,03770	1,03770
1700	0,12819	1,03775	1,03775
1800	-0,00330	1,03785	1,03785
1900	0,23006	1,03795	1,03795
2000	0,00588	1,03810	1,03810
2100	-0,10642	1,03820	1,03820
2200	-0,06240	1,03825	1,03825
2300	-0,00049	1,03835	1,03835

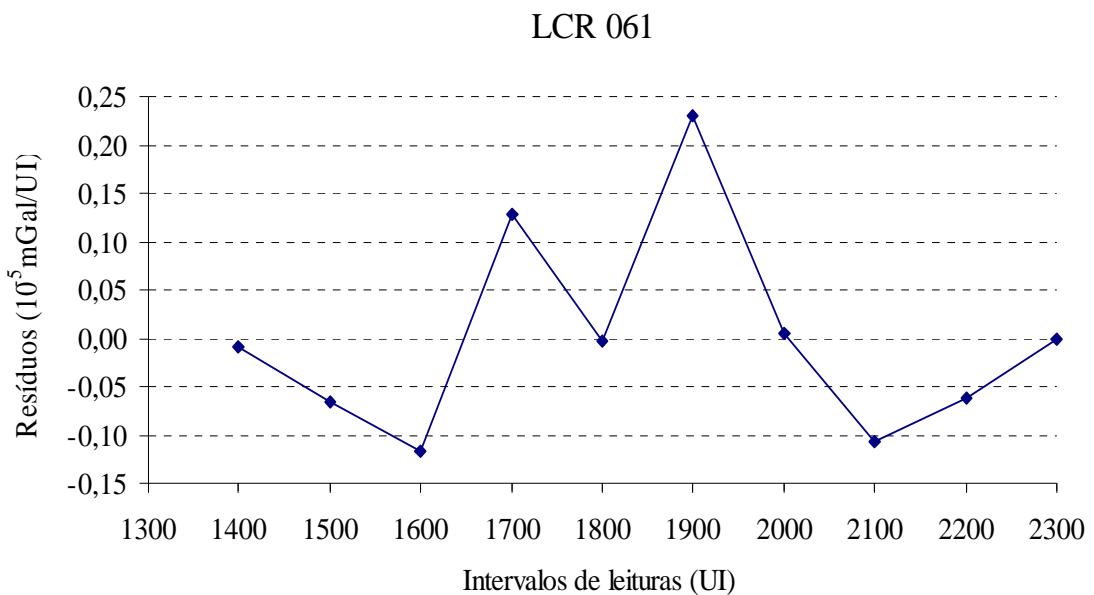


Figura 5.3 Distribuição dos resíduos dos coeficientes das funções de calibração do gravímetro LCR G061.

Tabela 5.5 Os coeficientes da função de calibração do gravímetro LCR G190.

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR, G190

Número de coeficientes da função de calibração: 6			
Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2400	0,00289	1,04834	1,04834
2500	-0,00177	1,04844	1,04844
2600	-0,00194	1,04855	1,04855
2700	-0,00074	1,04867	1,04867
2800	-0,00131	1,04880	1,04880
2900	0,00288	1,04894	1,04894

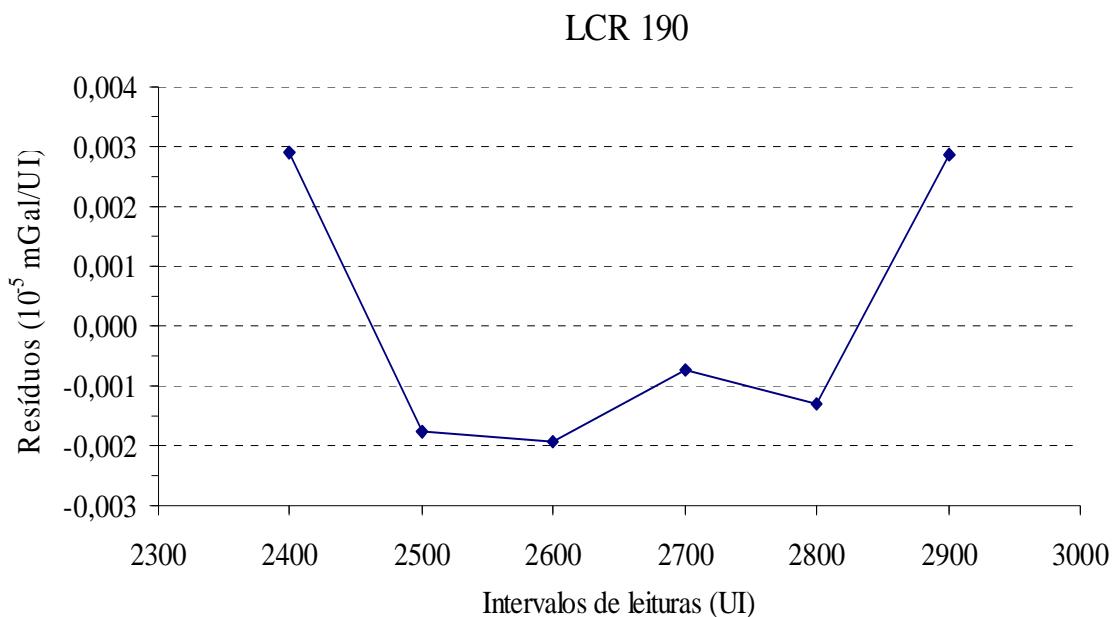


Figura 5.4 Distribuição dos resíduos dos coeficientes das funções de calibração do gravímetro LCR G190.

Tabela 5.6 Os coeficientes da função de calibração do gravímetro CG5-600.

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-600

Número de coeficientes da função de calibração: 7			
Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2800	-0,07668	1,00000	1,00000
2900	-0,17374	1,00000	1,00000
3000	0,13526	1,00000	1,00000
3100	-0,19637	1,00000	1,00000
3200	0,24605	1,00000	1,00000
3300	-0,09141	1,00000	1,00000
3400	0,15689	1,00000	1,00000

CG5 - 600

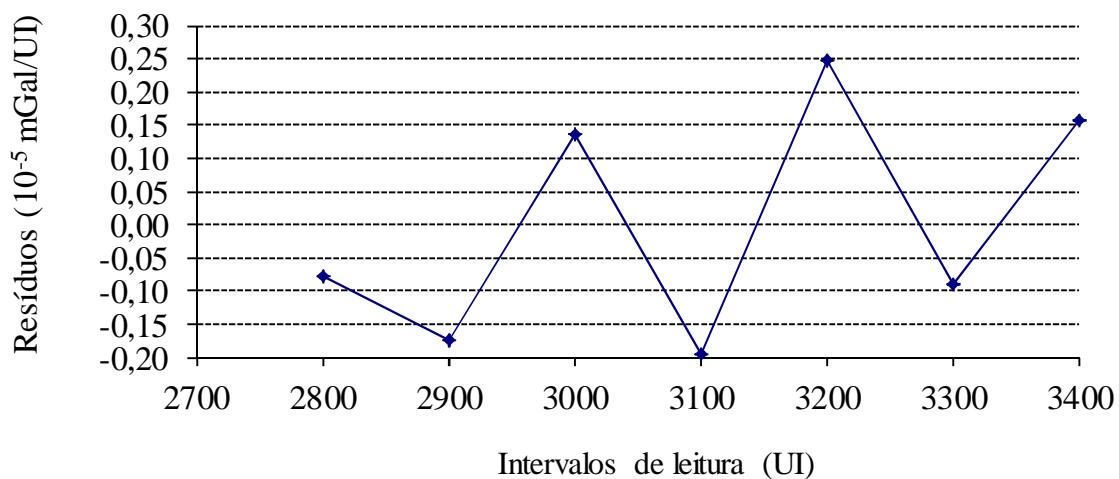


Figura 5.5 Distribuição dos resíduos dos coeficientes das funções de calibração do gravímetro CG5-600.

Tabela 5.7 Os coeficientes da função de calibração do gravímetro CG5-839.

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-839

Número de coeficientes da função de calibração: 11			
Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2600	-0,06660	1,00000	1,00000
2700	-0,08591	1,00000	1,00000
2800	-0,05295	1,00000	1,00000
2900	-0,18863	1,00000	1,00000
3000	0,36999	1,00000	1,00000
3100	-0,07922	1,00000	1,00000
3200	-0,24651	1,00000	1,00000
3300	0,15104	1,00000	1,00000
3400	-0,06288	1,00000	1,00000
3500	0,09882	1,00000	1,00000
3600	0,16286	1,00000	1,00000

CG5 - 839

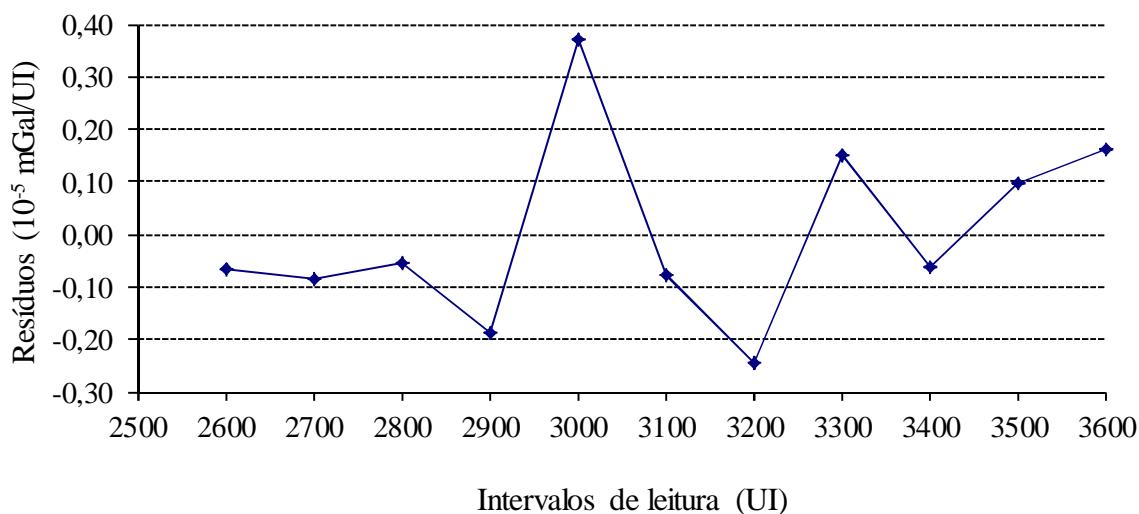


Figura 5.6 Distribuição dos resíduos dos coeficientes das funções de calibração do gravímetro CG5-839.

5.3 – Aplicação do aprimoramento do modelo D&E

Uma vez concluído o ajustamento da RGFB com a aplicação do modelo D&E, resta verificar o comportamento dos mais modernos gravímetros diferenciais CG5 com um modelo matemático adequado com a sua precisão junto ao datum gravimétrico local. A função de calibração do gravímetro CG5 é linear em todo o alcance da escala, portanto a conversão de UI para mGal é feita por um único fator de escala, determinado pelo fabricante, sendo automaticamente corrigido pelo sistema residente no instrumento. Assim, as leituras fornecidas pelo instrumento já são expressas em mGal. Entretanto, para efeito de aferição do instrumento, é importante verificar a coerência deste fator de escala com o datum gravimétrico local. Esta investigação foi feita utilizando o aprimoramento do modelo D&E, que está representado pela Eq.(4.34).

Neste modelo matemático, as grandezas observáveis são as leituras instrumentais, corrigidas da maré luni-solar, da deriva instrumental e da correção da elevação em UI, e as grandezas incógnitas são os valores de gravidade (g_i) e fatores de conversão ao datum gravimétrico por intervalo ($, \kappa_i$) para cada gravímetro (r). As ponderações usadas foram: (i) 0,026 UI para as leituras instrumentais medidas com os LCR; 0,010 UI para as leituras instrumentais medidas com os CG5; os valores de gravidade de referência foram os desvios padrão da Tab.(2.2) e os valores dos fatores de conversão ao datum local por intervalo foi de 1×10^{-4} . A Tab. 5.8 resume os critérios utilizados e os valores.

Tabela 5.8 O teste Global aplicado com um nível de significância de 5% mostrando que a hipótese nula não foi rejeitada ($\sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$).

Critérios utilizados	Valores do ajustamento
Número de intervalos distintos	1739
Número de parâmetro	736
Grau de liberdade do ajustamento	1014
Variância <i>a priori</i>	1,000
Variância <i>a posteriori</i>	1,009
Qui-quadrado teórico	[927,65; 1104,14]
Qui-quadrado calculado	1023,13

O maior valor dos resíduos para as leituras instrumentais foi 0,043 UI referente ao mesmo intervalo da gravidade que apresentou o maior resíduo na aplicação do modelo D&E,

que é o intervalo 034384 – 031578 medido com o gravímetro LCR G674. A Fig. 5.7 mostra a distribuição destes resíduos.

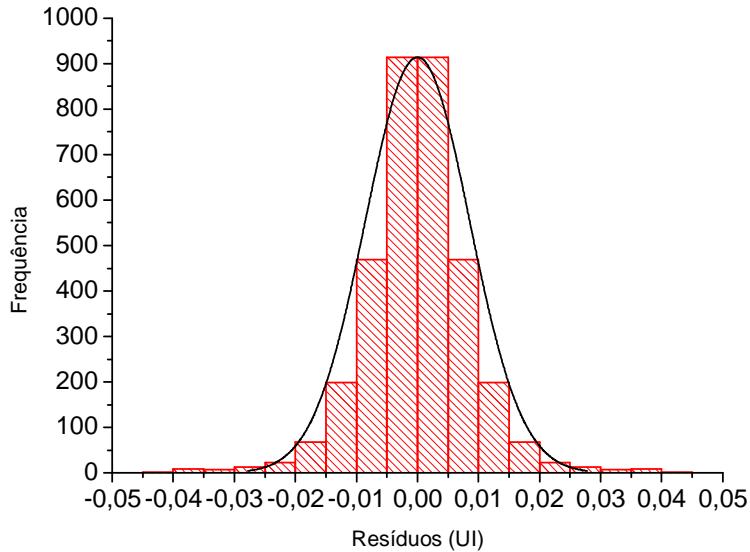


Figura 5.7 Distribuição dos resíduos das leituras instrumentais. Em preto, uma curva Gaussiana com o mesmo valor médio e desvio padrão: $0,000 \pm 0,009$ UI.

A estação gravimétrica IFE172, tanto no modelo D&E e no seu aprimoramento, apresentou o maior resíduo. O valor do seu resíduo na aplicação do aprimoramento do modelo D&E foi de -11,2 microgals (Tab.5.9 e Fig.5.8).

Tabela 5.9 Os 11 valores de gravidade ajustados no ajustamento da RGFB pelo aprimoramento do modelo de D&E.

Código da estação	Localização das estações	Correções (μGal)	Valores de g (μGal)	σ (μGal)
IFE040	Sta Elena Uairen	3,6	977 822 088	10
IFE112	Teresina	-4,5	978 016 338	9
IFE122	Brasília	3,6	978 048 802	9
IFE132	Viçosa	1,5	978 460 232	9
IFE142	Vassouras	-4,4	978 637 577	9
IFE152	Vinhedo	-3,2	978 563 775	9
IFE162	Curitiba	2,6	978 760 390	9
IFE172	Santa Maria	-11,2	979 261 625	8
IFE212	Rivera	7,5	979 344 384	9
IFE222	Toledo	-2,3	979 715 853	9
IFE232	Paysandu	6,8	979 523 533	9

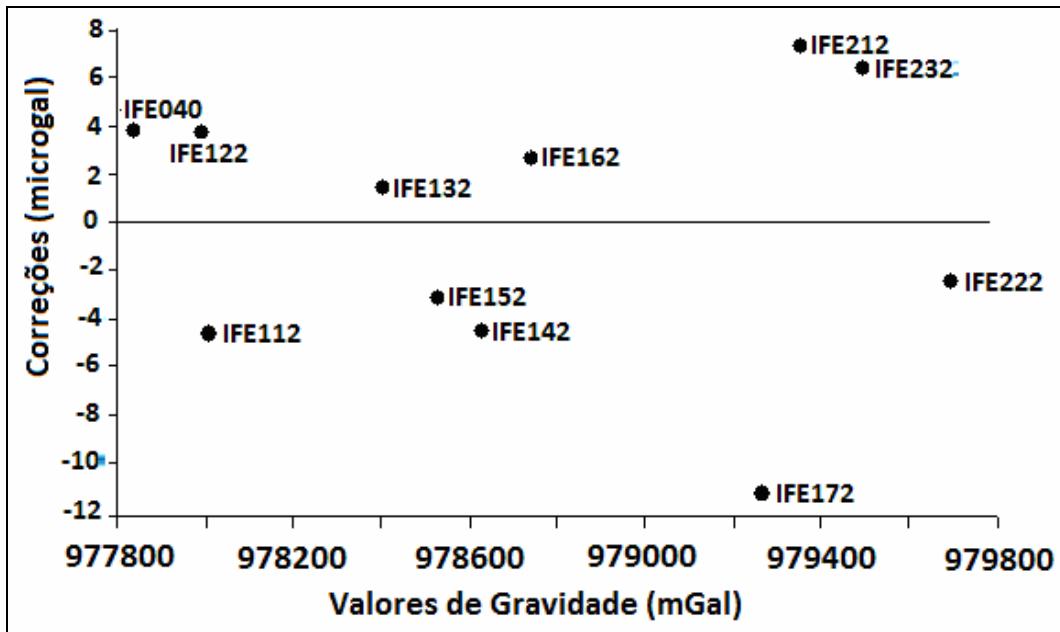


Figura 5.8 Distribuição dos resíduos dos valores de gravidade absolutos. Não houve nenhuma tendenciosidade nestas grandezas, uma vez que somatório das correções é igual à zero.

Cada intervalo da gravidade terá seu fator de conversão ao datum gravimétrico local por intervalo ($, \kappa_i$). Esses fatores serão comparados com os fatores lineares de escala ajustados pelo modelo D&E. Como os intervalos de gravidade são discretizados de 100 em 100 unidades, pode-se calcular o erro que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo. Por exemplo, as tabelas 5.10 até 5.13 e as figuras 5.9 até 5.12 mostram os valores dos fatores de conversão ao datum gravimétrico por intervalo de alguns gravímetros diferenciais LCR e CG5, verifica-se que não há uma tendenciosidade com essa grandeza. O apêndice III mostra o restante dos valores desses fatores de conversão ao datum local para os outros gravímetros diferenciais e os erros que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo. O maior erro que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo foi de 22,6 microgals referente ao gravímetro LCR G011, no intervalo 1800, que é menor comparado com sua precisão (0,026 microgal) (Berquó *et al*, 2011). Então, para o gravímetro LCR, modelo G, pode-se utilizar apenas um fator linear de escala para uma amplitude igual à da RGFB. Agora, para os gravímetros CG5, onde sua precisão é de 5 microgal, é preciso utilizar mais de um fator de conversão ao datum gravimétrico por intervalo. Estes resultados comprovam para a necessidade de desenvolvimento de modelos que levem em conta a não linearidade da função de conversão de datum gravimétrico local no ajustamento de redes de grande extensão.

Tabela 5.10 Fatores de conversão ao datum local por intervalo para o gravímetro LCR G011.

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G011 (k_{linear}): 0.998910

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1600	1,03453	0,998800	1,03329	-11,00
1700	1,03448	0,998976	1,03342	6,60
1800	1,03444	0,999136	1,03355	22,60
1900	1,03433	0,998867	1,03316	-4,30
2000	1,03428	0,998735	1,03297	-17,50
2100	1,03428	0,998773	1,03301	-13,70
2200	1,03433	0,999029	1,03333	11,90
2300	1,03443	0,998993	1,03339	8,30

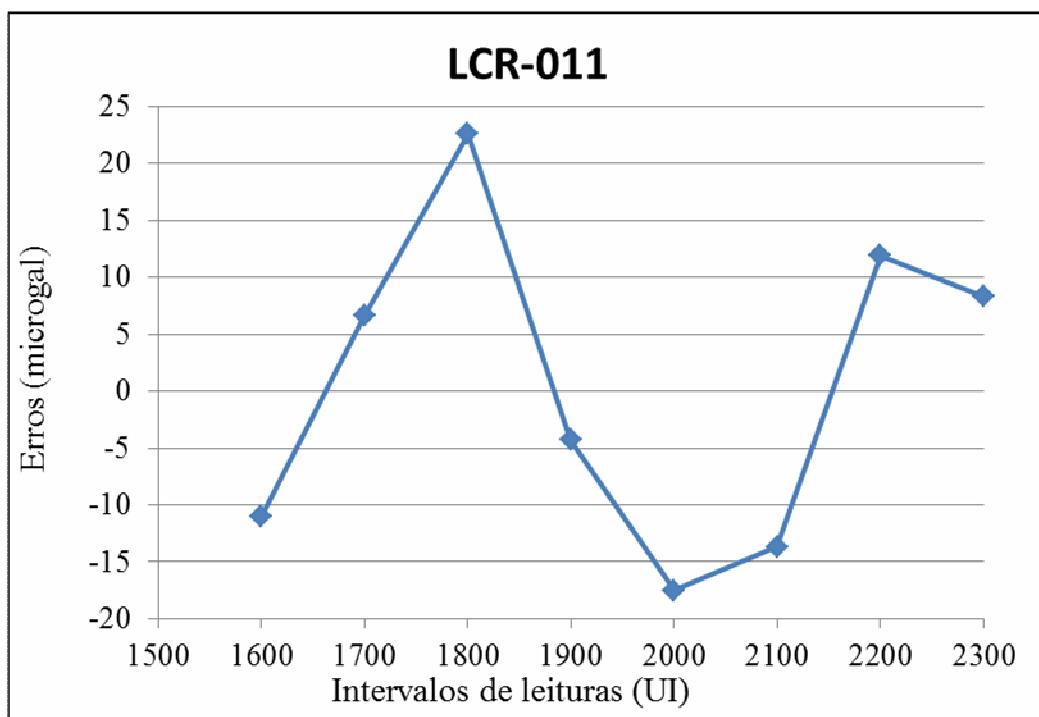


Figura 5.9 Erros que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo.

Tabela 5.11 Fatores de conversão ao datum local por intervalo para o gravímetro LCR G061.

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local				
Fator linear de escala do gravímetro LCR G061 (k_{linear}): 1,000068				
Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1400	1,03760	1,000058	1,03766	-1,00
1500	1,03765	1,000068	1,03772	0,00
1600	1,03770	1,000044	1,03775	-2,40
1700	1,03775	1,000195	1,03795	12,70
1800	1,03785	1,000014	1,03786	-5,40
1900	1,03795	1,000176	1,03813	10,80
2000	1,03810	1,000045	1,03815	-2,30
2100	1,03820	0,999982	1,03818	-8,60
2200	1,03825	1,000012	1,03826	-5,60
2300	1,03835	1,000068	1,03842	0,00

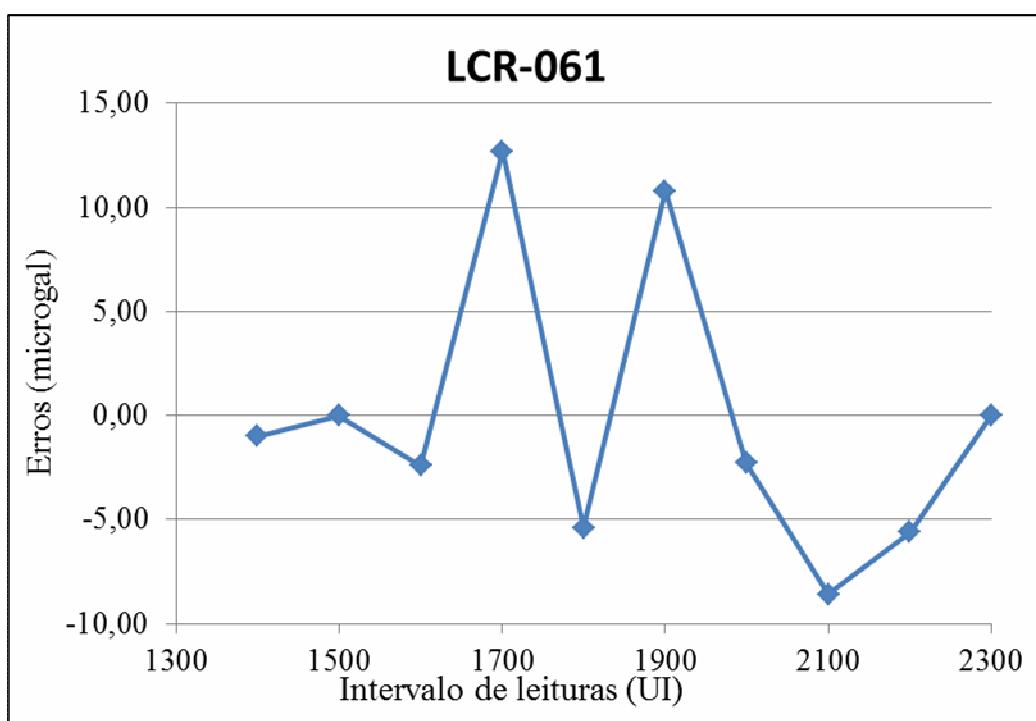


Figura 5.10 Erros que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo.

Tabela 5.12 Fatores de conversão ao datum local por intervalo para o gravímetro CG5-343.

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local				
Fator linear de escala do gravímetro CG5-343 (k_{linear}): 1.000496				
Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
7400	1,00000	1,000513	1,000513	1,7
7500	1,00000	1,000313	1,000313	-18,3
7600	1,00000	1,000584	1,000584	8,8
7700	1,00000	1,000511	1,000511	1,5
7800	1,00000	1,000495	1,000495	-0,1
7900	1,00000	1,000522	1,000522	2,6
8000	1,00000	1,000554	1,000554	5,8
8100	1,00000	1,000399	1,000399	-9,7

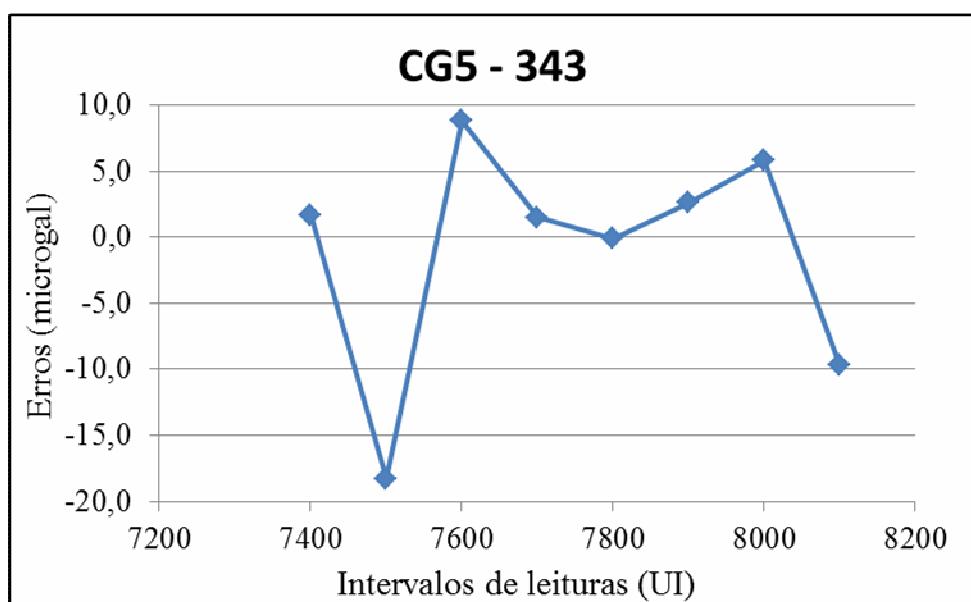


Figura 5.11 Erros que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo.

Tabela 5.13 Fatores de conversão ao datum local por intervalo para o gravímetro CG5-839.

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local				
Fator linear de escala do gravímetro CG5-839 (k_{linear}): 0999634				
Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2600	1,00000	0,999590	0,999590	-4,40
2700	1,00000	0,999587	0,999587	-4,70
2800	1,00000	0,999629	0,999629	-0,50
2900	1,00000	0,999586	0,999586	-4,80
3000	1,00000	0,999786	0,999786	15,20
3100	1,00000	0,999595	0,999595	-3,90
3200	1,00000	0,999560	0,999560	-7,40
3300	1,00000	0,999716	0,999716	8,20
3400	1,00000	0,999586	0,999586	-4,80
3500	1,00000	0,999676	0,999676	4,20
3600	1,00000	0,999730	0,999730	9,60

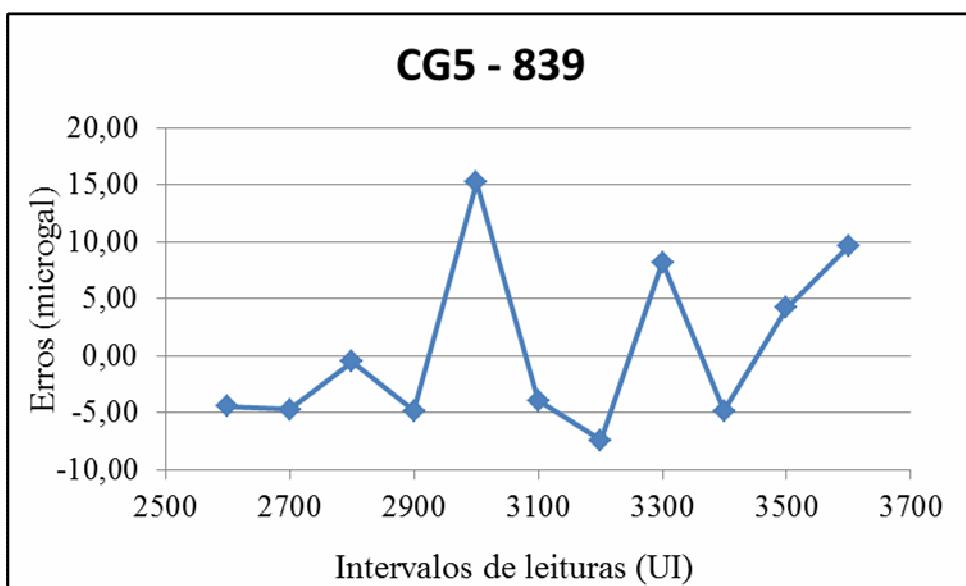


Figura 5.12 Erros que uma leitura pode sofrer no respectivo intervalo.

Capítulo 6

Conclusões

A aferição dos gravímetros CG5 em relação à variação da altitude mostra-se bem coerente com as suas especificações e teve um comportamento satisfatório quando submetido a variações bruscas de temperatura e pressão, como é o caso da LC ON-NA, ou seja, os valores dos resíduos ficaram na ordem do microgal utilizando o aprimoramento do modelo D&E.

O modelo D&E revelou-se adequado para o ajustamento de redes gravimétricas relativas. As ponderações utilizadas com base nos desvios padrões estimados em 0,030 UI para as leituras instrumentais medidas com os LCR, modelo G, e 0,010 UI para as medidas com os CG5, 1×10^{-5} mGal/UI para os coeficientes das funções de calibração e as apresentadas na Tab.2.2 para as estações gravimétricas absolutas foram adequadas ao ajustamento. A estimativa da variância da observação da unidade de peso *a posteriori* foi de $1,014 \text{ mGal}^2$, estatisticamente igual à variância *a priori* de $1,0 \text{ mGal}^2$ (Tab.5.1), que é o valor esperado em virtude do critério de ponderação usado. Além disso, observa-se que as leituras instrumentais ajustadas apresentaram resíduos abaixo de duas vezes o desvio padrão usado no ajustamento; a maior correção para as funções calibração foi de $6,9 \times 10^{-6}$ mGal/UI, abaixo do desvio padrão estimado no ajustamento de 1×10^{-5} mGal/UI.

Os resíduos estimados para os coeficientes das funções de calibração foram insignificantes (menores do que o valor estimado para o valor do desvio padrão destas grandezas), o que mostra que tanto os gravímetros LCR quanto os CG5 estão funcionando em perfeitas condições. Nenhum efeito sistemático foi observado na distribuição dos resíduos estimados para as grandezas observadas usando este modelo D&E.

Não obstante a adequação do modelo D&E para o ajustamento de redes gravimétricas, a alteração deste modelo pela remoção do fator linear de conversão de datum, ou seja, igualando-o à unidade, evidenciou a possibilidade de não linearidade neste efeito pela constatação de diferenças significativas nos valores estimados para este fator nos diversos intervalos de leitura da tabela de calibração (Tab.5.10 a 5.13, Apêndice III), por exemplo, o gravímetro CG5 308 apresentou no intervalo discretizado 3400 um erro de -29,2 microGal.

Consequentemente, qualquer leitura instrumental estimada neste intervalo estará sujeita a um erro desta magnitude, que é cerca de 5 vezes a precisão do instrumento (5 microGal). Valores da mesma ordem de grandeza são observados para os outros gravímetros CG5. Estes resultados comprovam para a necessidade de desenvolvimento de modelos matemáticos que levem em conta a não linearidade da função de conversão ao datum gravimétrico por intervalo no ajustamento de redes de grande extensão, onde se pretende ajustar observações gravimétricas com precisão de micragal. Para os gravímetros LCR, o maior erro apresentado foi de 22,6 μ Gal referente ao gravímetro LCR G011 no intervalo 1800. Este erro está dentro da precisão do instrumento (26 microGal). Portanto, para os gravímetros LCR apenas um fator linear de escala mostrou-se suficiente para a conversão ao datum na amplitude de gravidade de 1919 mGal, como a encontrada na RGFB, enquanto que, para os gravímetros CG5, mostrou-se necessário considerar o comportamento não linear nesta conversão.

Eventuais variações nas características dos gravímetros podem comprometer o seu desempenho, com reflexo na qualidade das medidas. Escala e deriva são características muito afetadas por esse tipo de problema. Assim, com reocupações periódicas da LC ON-AN será possível monitorar eventuais mudanças nessas características, que podem estar associadas ao mau funcionamento dos dispositivos térmicos e barométricos, por exemplo.

A LC ON-AN possibilita a verificação do comportamento dos gravímetros para valores de gravidade inferiores aos do Rio de Janeiro, correspondendo aproximadamente a metade da amplitude de gravidade do Brasil. Como a gravidade varia também em latitude, deve-se desenvolver um estudo posterior desde o Rio de Janeiro até a estação de Rivera (URU), para verificar a comportamento destes gravímetros para valores de gravidade superiores ao do Rio de Janeiro. Investigar se as interações de outros corpos celestes terão influências na ordem do micragal e também se as correções que não foram tratadas nesta pesquisa podem ser significativas em relação à precisão do CG5.

Apêndice I

As descrições das 8 novas estações gravimétricas da LC ON-AN para atender as necessidades dos gravímetros diferenciais Scintrex CG5.



Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Igreja Paracambi 1/4

UF: RJ

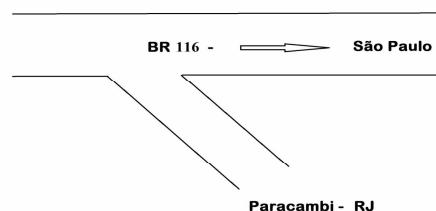
Código da estação: CAL1-1

Valor de gravidade: $978744,928 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}53'43,0''$ **Longitude:** $-43^{\circ}13'31''$ **Altitude:** 65 m

Localização: O gravímetro situado na calçada ao lado direito do portão de entrada da igreja Assembleia de Deus, em Paracambi.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Obelisco da Serra das Araras

UF: RJ

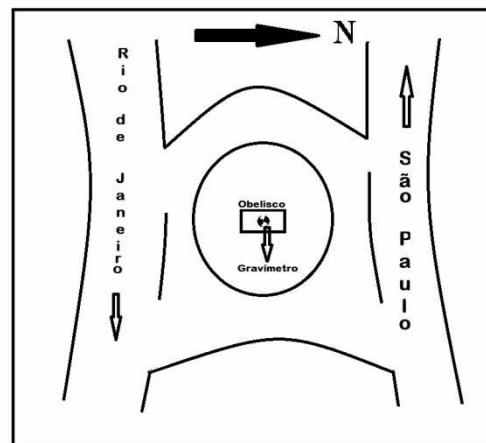
Código da estação: CAL1-2

Valor de gravidade: $978667,329 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}39'56''$ **Longitude:** $-43^{\circ}50'27''$ **Altitude:** 432 m

Localização: O gravímetro está sobre o obelisco situado na Serra das Araras, perto do posto da Polícia Rodoviária Federal.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Barra Mansa 1/12

UF: RJ

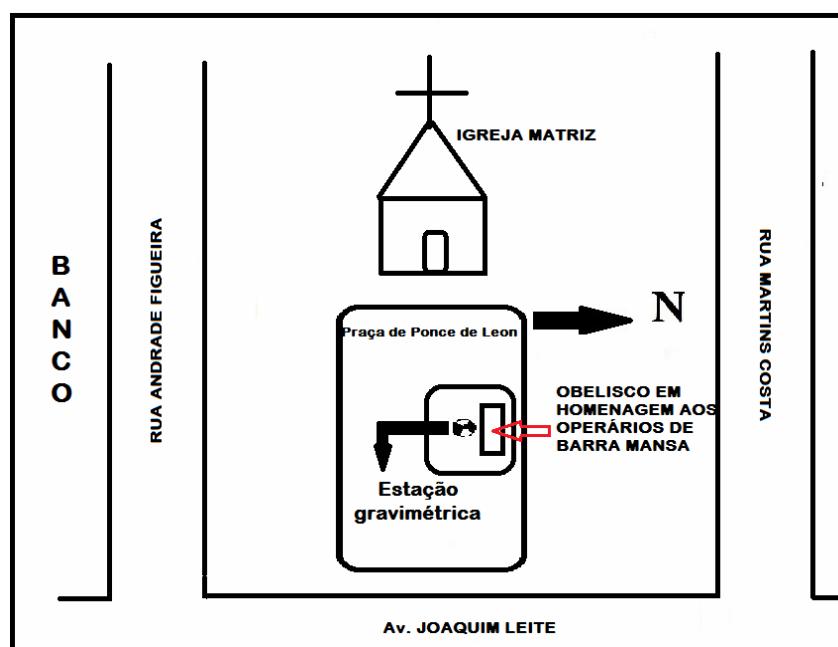
Código da estação: CAL1-3

Valor de gravidade: $978648,000 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}32'44''$ **Longitude:** $-44^{\circ}10'16''$ **Altitude:** 423 m

Localização: O gravímetro está localizado em frente ao obelisco que foi construído em homenagem aos operários de Barra Mansa, localizado na praça ao lado de uma igreja.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Estação km 18

UF: RJ

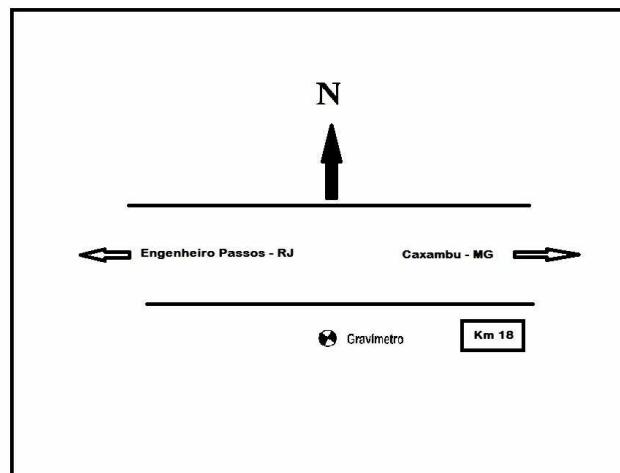
Código da estação: CAL2-1

Valor de gravidade: $978556,251 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}27'51,0''$ **Longitude:** $-44^{\circ}43'03,0'$ **Altitude:** 664 m

Localização: O gravímetro Scintrex CG5 localizado na soleira. Essa localização fica próximo ao km 18 no sentido para a estação Fazenda Lapa.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Capela São José

UF: RJ

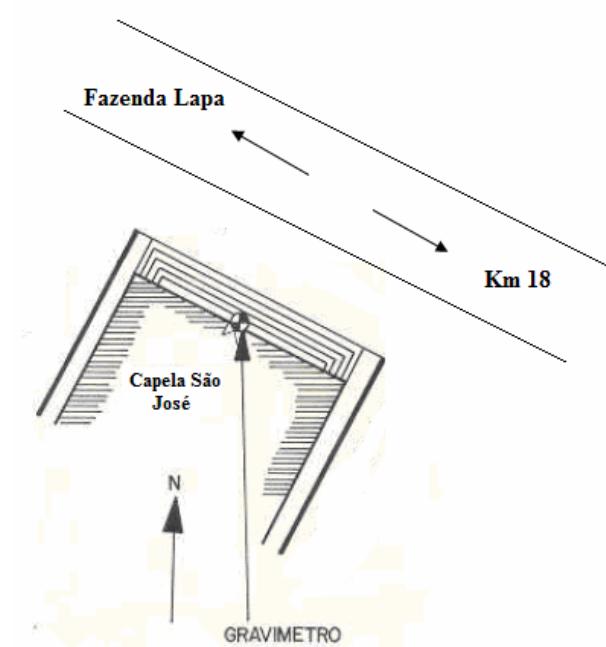
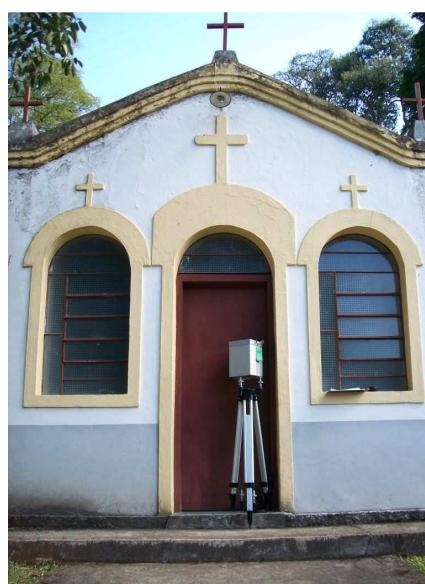
Código da estação: CAL2-2

Valor de gravidade: $978506,324 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}26'23,0''$ **Longitude:** $-44^{\circ}44'10,0''$ **Altitude:** 867 m

Localização: O gravímetro Scintrex CG5 localizado ao lado direito na soleira da Capela de São José, à direita da porta principal.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Bueiro Cal 4-2

UF: RJ

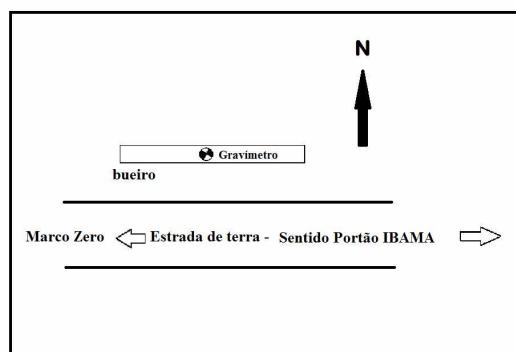
Código da estação: CAL4-2

Valor de gravidade: $978277,068 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}22'05,0''$ **Longitude:** $-44^{\circ}44'58,0'$ **Altitude:** 1910 m

Localização: O gravímetro Scintrex CG5 localizado ao lado direito do bueiro. Esse bueiro fica ao lado esquerdo da estrada de terra, perto de uma curva acentuada, em direção ao portão do IBAMA.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Bueiro Cal 4-4

UF: RJ

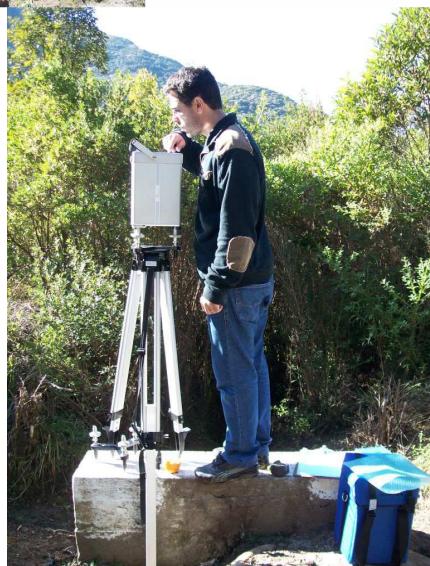
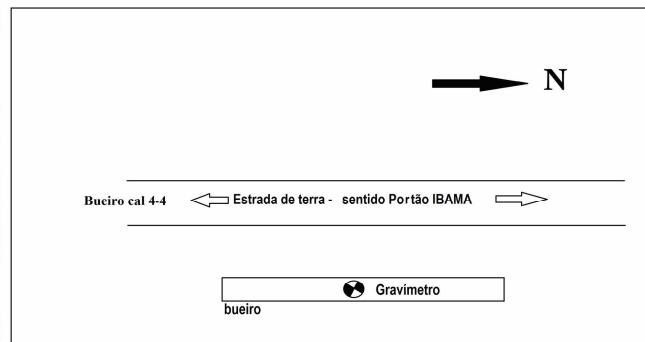
Código da estação: CAL4-4

Valor de gravidade: $978227,024 \pm 0,012$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}21'27,0''$ **Longitude:** $-44^{\circ}44'14,0''$ **Altitude:** 2138 m

Localização: O gravímetro Scintrex CG5 localizado ao lado esquerdo do bueiro. Esse bueiro fica ao lado direito da estrada de terra em direção ao portão do IBAMA.





Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Observatório Nacional

Identificação das Estações Gravimétricas da LC ON-AN

Nome da estação gravimétrica: Bueiro Cal 4-5

UF: RJ

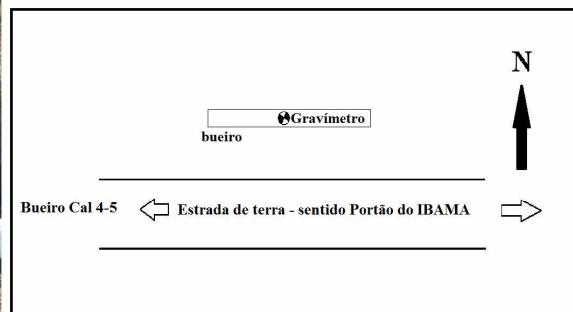
Código da estação: CAL4-5

Valor de gravidade: $978177,938 \pm 0,013$ mGal

Coordenadas (WGS/1984):

Latitude: $-22^{\circ}22'15,0''$ **Longitude:** $-44^{\circ}42'21,0'$ **Altitude:** 2376 m

Localização: O gravímetro Scintrex CG5 localizado ao lado direito do bueiro. Esse bueiro fica ao lado esquerdo da estrada de terra em direção ao portão do IBAMA.



Apêndice II

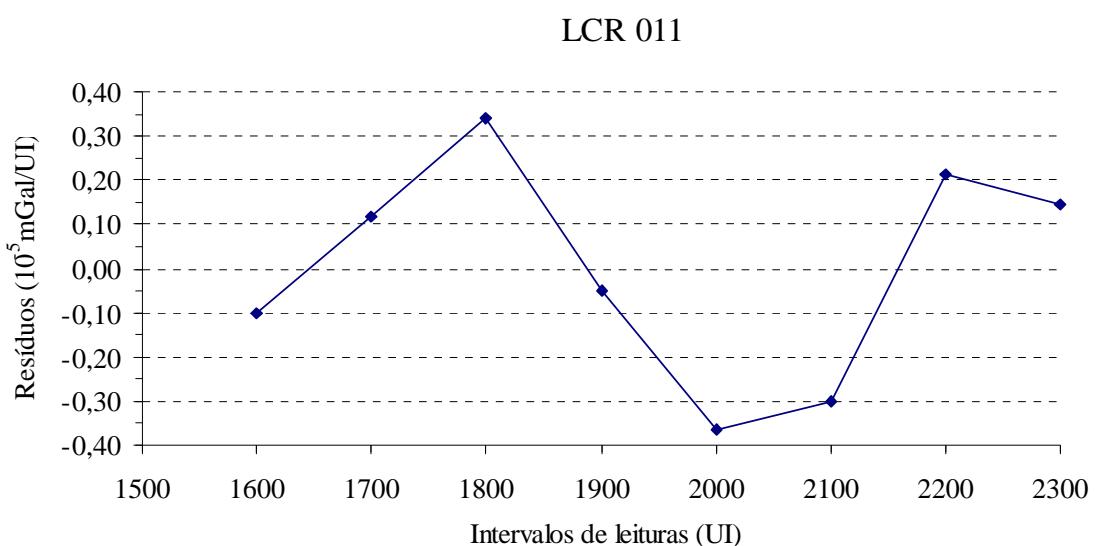
Os valores dos coeficientes das funções de calibração dos gravímetros diferenciais LCR e CG5 estimados pelo modelo D&E.

Gravímetro LCR G011

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G011

Número de coeficientes da função de calibração: 8

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1600	-0,10326	1,03453	1,03453
1700	0,11919	1,03448	1,03448
1800	0,34039	1,03444	1,03444
1900	-0,04895	1,03433	1,03433
2000	-0,36571	1,03428	1,03428
2100	-0,29974	1,03428	1,03428
2200	0,21140	1,03433	1,03433
2300	0,14660	1,03443	1,03443

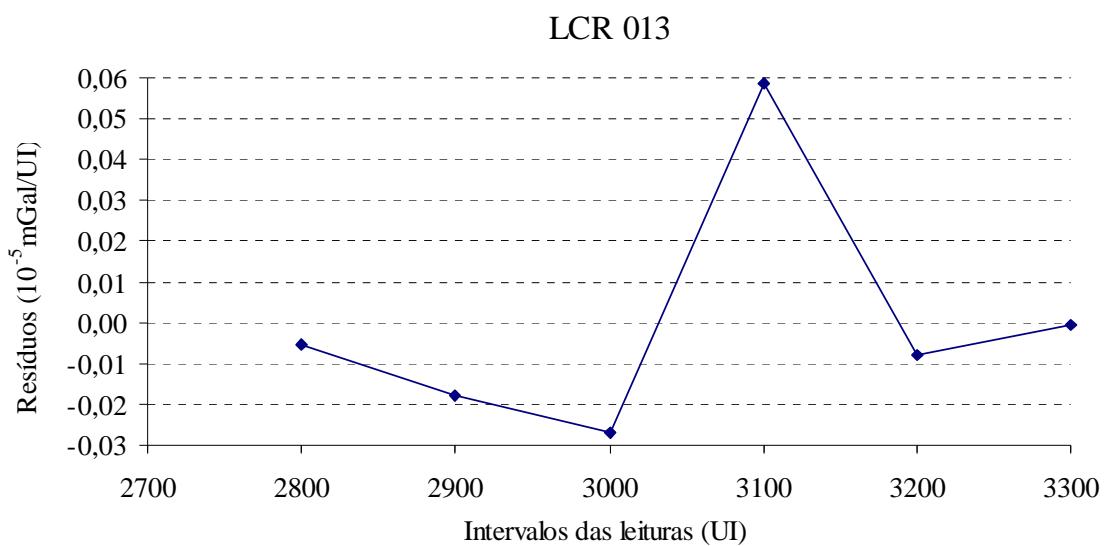


Gravímetro LCR G013

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G013

Número de coeficientes da função de calibração: 6

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2800	-0,00522	1,04858	1,04858
2900	-0,01810	1,04868	1,04868
3000	-0,02678	1,04880	1,04880
3100	0,05887	1,04894	1,04894
3200	-0,00799	1,04909	1,04909
3300	-0,00079	1,04923	1,04923

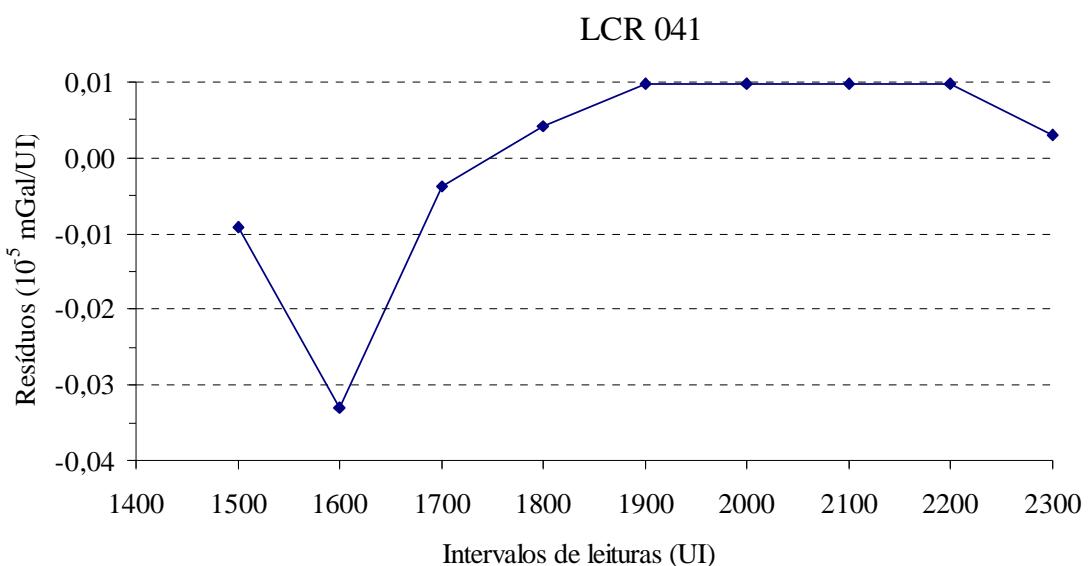


Gravímetro LCR G041

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G041

Número de coeficientes da função de calibração: 9

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1500	-0,0091	1,04335	1,04335
1600	-0,0331	1,04340	1,04340
1700	-0,0038	1,04340	1,04340
1800	0,0041	1,04335	1,04335
1900	0,0097	1,04325	1,04325
2000	0,0097	1,04310	1,04310
2100	0,0097	1,04335	1,04335
2200	0,0097	1,04360	1,04360
2300	0,0030	1,04370	1,04370



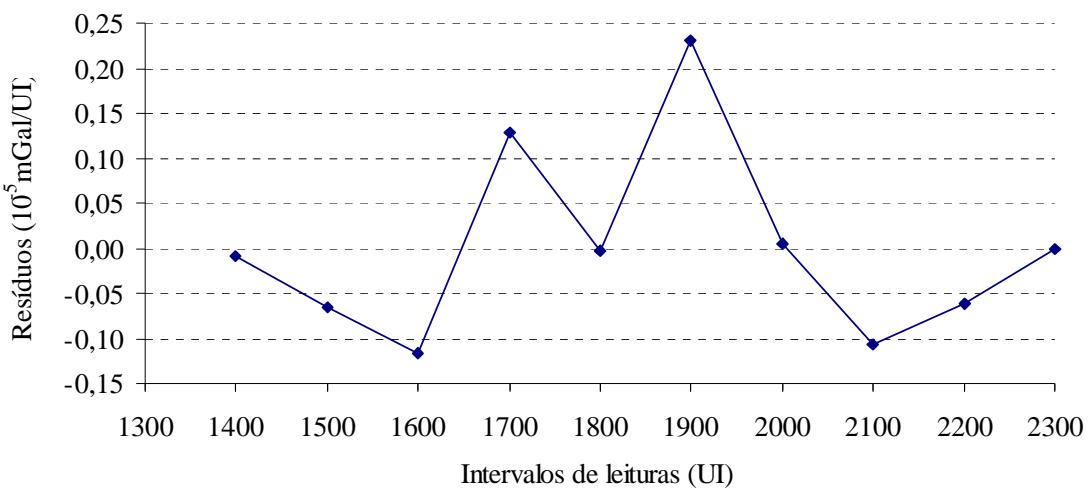
Gravímetro LCR G061

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G061

Número de coeficientes da função de calibração: 10

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1400	-0,00886	1,03760	1,03760
1500	-0,06664	1,03765	1,03765
1600	-0,11600	1,03770	1,03770
1700	0,12819	1,03775	1,03775
1800	-0,00330	1,03785	1,03785
1900	0,23006	1,03795	1,03795
2000	0,00588	1,03810	1,03810
2100	-0,10642	1,03820	1,03820
2200	-0,06240	1,03825	1,03825
2300	-0,00049	1,03835	1,03835

LCR 061

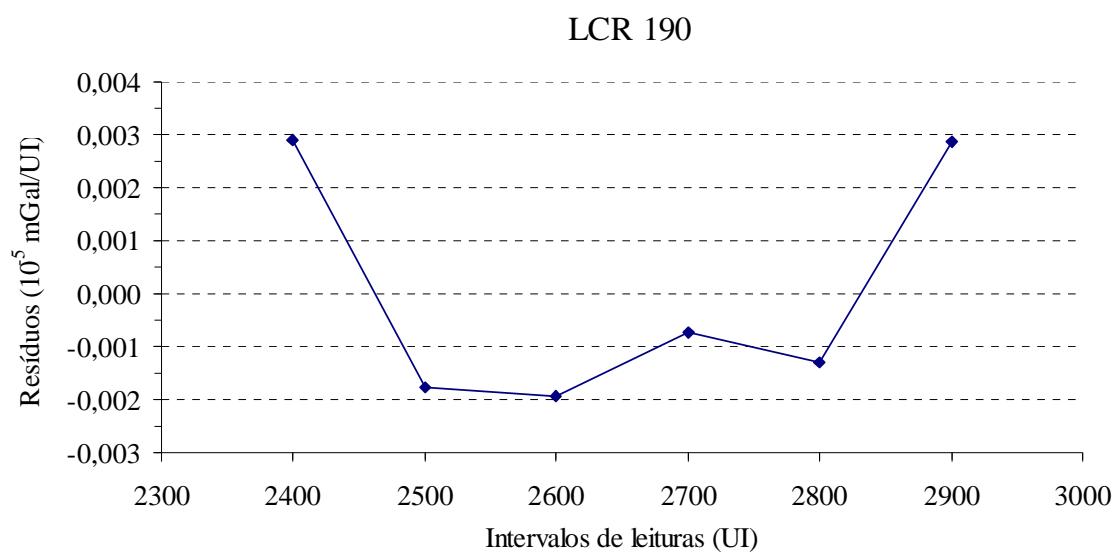


Gravímetro LCR G190

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G190

Número de coeficientes da função de calibração: 6

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2400	0,00289	1,04834	1,04834
2500	-0,00177	1,04844	1,04844
2600	-0,00194	1,04855	1,04855
2700	-0,00074	1,04867	1,04867
2800	-0,00131	1,04880	1,04880
2900	0,00288	1,04894	1,04894

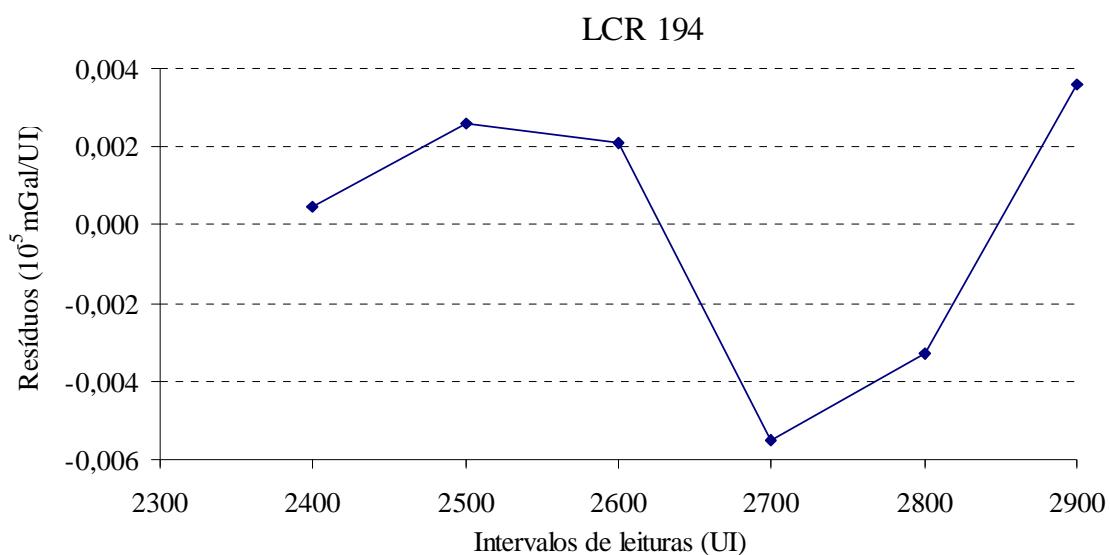


Gravímetro LCR G194

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G194

Número de coeficientes da função de calibração: 6

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2400	0,00047	1,04624	1,04624
2500	0,00258	1,04629	1,04629
2600	0,00210	1,04635	1,04635
2700	-0,00549	1,04642	1,04642
2800	-0,00327	1,04650	1,04650
2900	0,00361	1,04660	1,04660

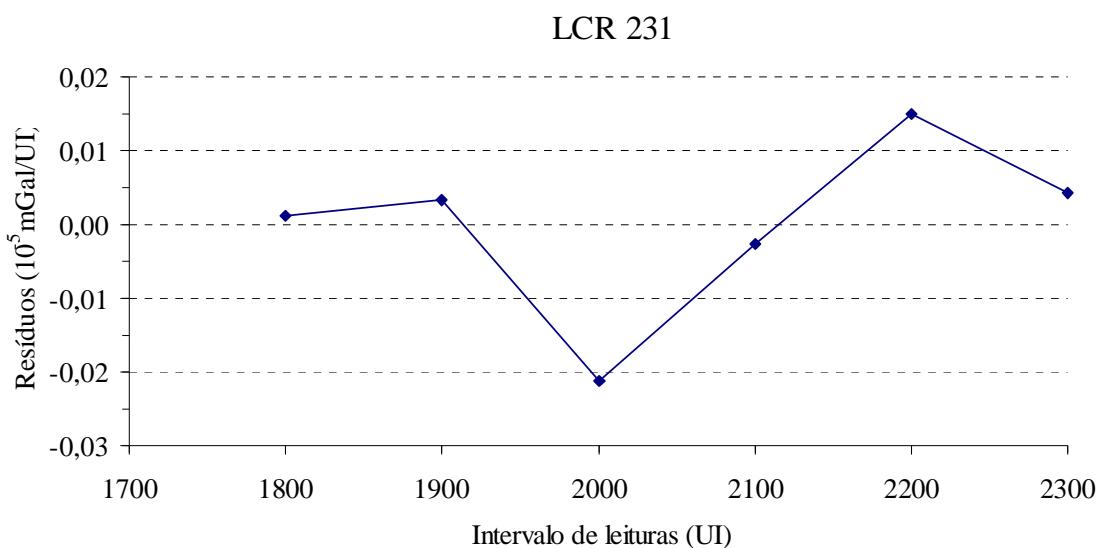


Gravímetro LCR G231

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G231

Número de coeficientes da função de calibração: 6

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1800	0,00113	1,06070	1,06070
1900	0,00326	1,06080	1,06080
2000	-0,02115	1,06087	1,06087
2100	-0,00255	1,06095	1,06095
2200	0,01506	1,06102	1,06102
2300	0,00424	1,06110	1,06110



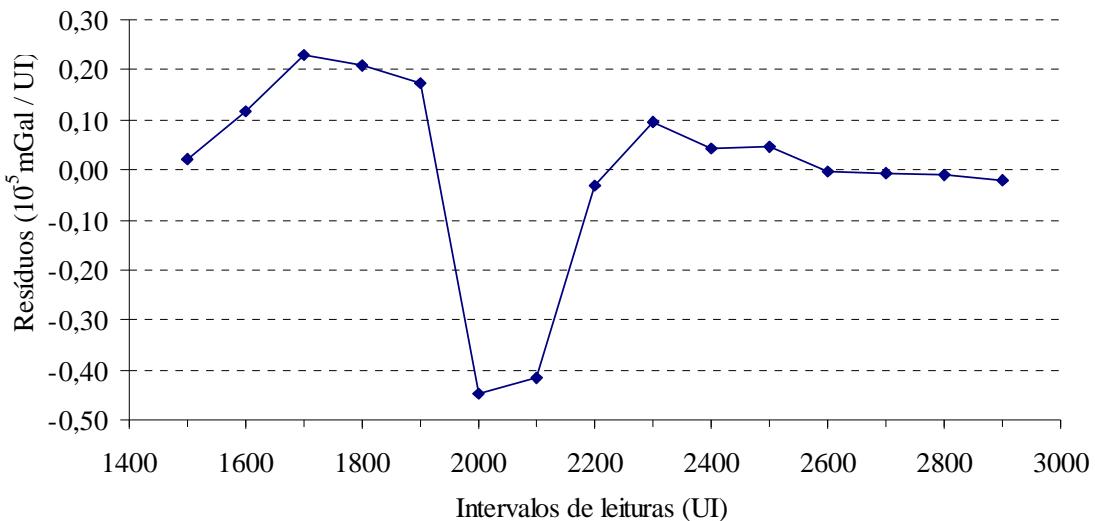
Gravímetro LCR G257

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G257

Número de coeficientes da função de calibração: 15

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1500	0,02263	1,06792	1,06792
1600	0,11638	1,06797	1,06797
1700	0,22822	1,06799	1,06799
1800	0,20771	1,06803	1,06803
1900	0,17280	1,06813	1,06813
2000	-0,44588	1,06825	1,06825
2100	-0,41491	1,06835	1,06835
2200	-0,03171	1,06843	1,06843
2300	0,09721	1,06848	1,06848
2400	0,04361	1,06855	1,06855
2500	0,04481	1,06864	1,06864
2600	-0,00151	1,06876	1,06876
2700	-0,00750	1,06888	1,06888
2800	-0,01005	1,06901	1,06901
2900	-0,02163	1,06911	1,06911

LCR 257

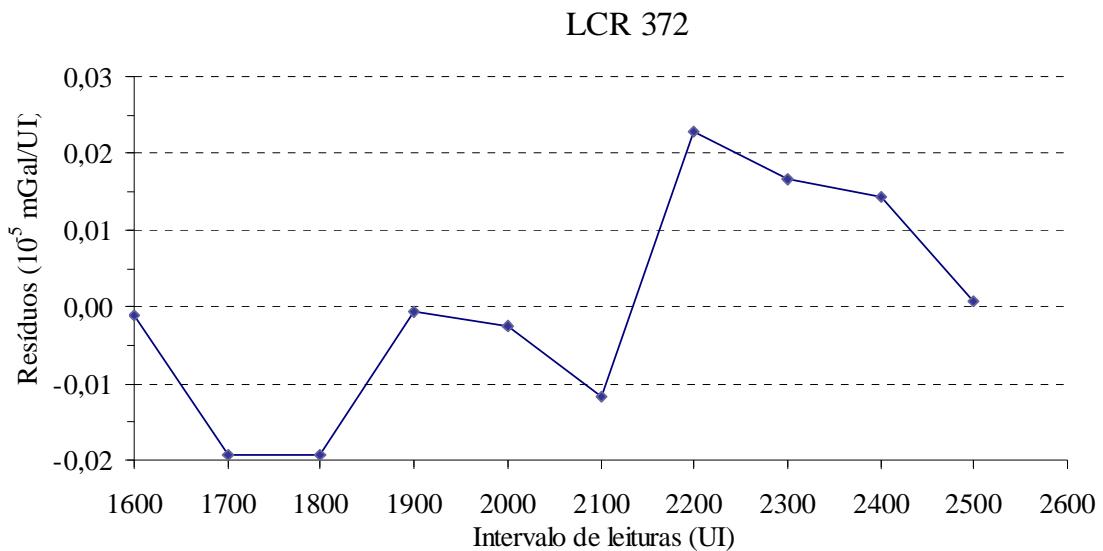


Gravímetro LCR G372

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G372

Número de coeficientes da função de calibração: 10

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1600	-0,00110	1,06776	1,06776
1700	-0,01931	1,06775	1,06775
1800	-0,01937	1,06775	1,06775
1900	-0,00065	1,06776	1,06776
2000	-0,00238	1,06778	1,06778
2100	-0,01179	1,06780	1,06780
2200	0,02284	1,06782	1,06782
2300	0,01664	1,06785	1,06785
2400	0,01431	1,06788	1,06788
2500	0,00081	1,06791	1,06791

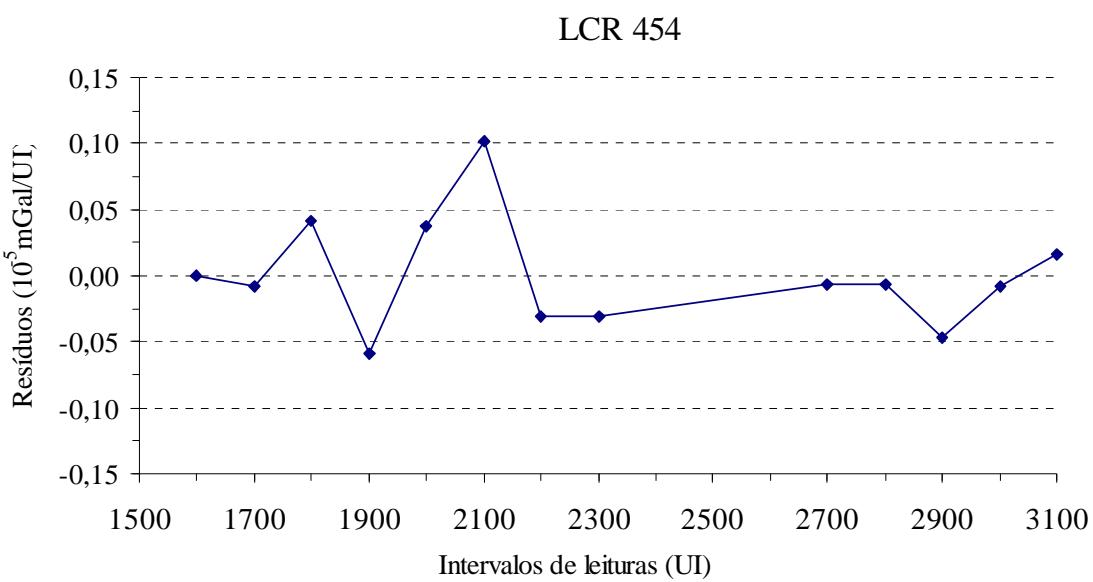


Gravímetro LCR G454

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G454

Número de coeficientes da função de calibração: 13

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1600	0,00048	1,05047	1,05047
1700	-0,00778	1,05062	1,05062
1800	0,04118	1,05077	1,05077
1900	-0,05949	1,05092	1,05092
2000	0,03792	1,05108	1,05108
2100	0,10169	1,05125	1,05125
2200	-0,03142	1,05142	1,05142
2300	-0,03036	1,05159	1,05159
2700	-0,00663	1,05238	1,05238
2800	-0,00688	1,05259	1,05259
2900	-0,04655	1,05279	1,05279
3000	-0,00839	1,05300	1,05300
3100	0,01630	1,05322	1,05322

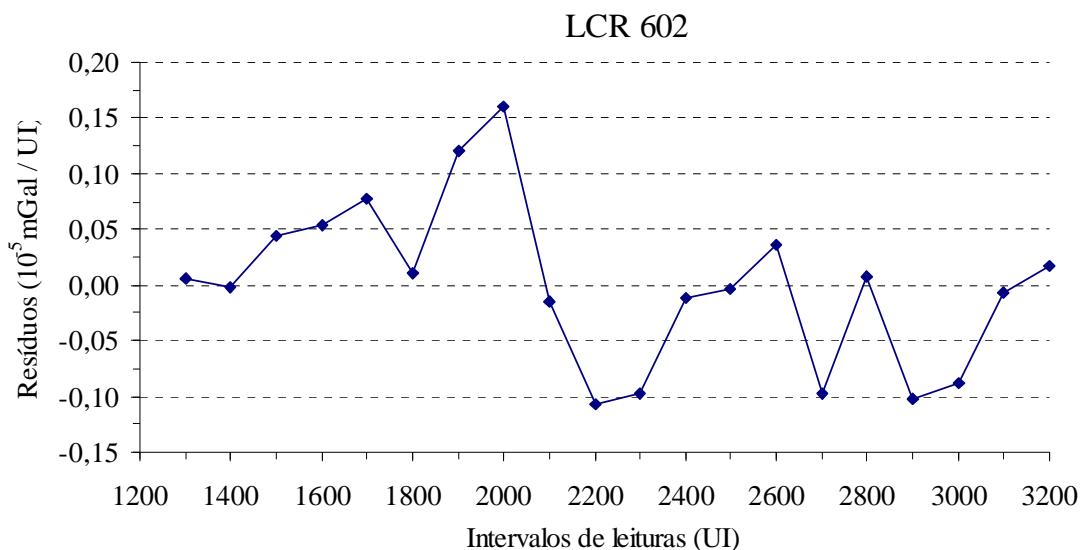


Gravímetro LCR G602

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G602

Número de coeficientes da função de calibração: 20

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1300	0,00597	1,03667	1,03667
1400	-0,00227	1,03680	1,03680
1500	0,04351	1,03692	1,03692
1600	0,05308	1,03705	1,03705
1700	0,07782	1,03720	1,03720
1800	0,00998	1,03733	1,03733
1900	0,12081	1,03747	1,03747
2000	0,15957	1,03760	1,03760
2100	-0,01413	1,03775	1,03775
2200	-0,10764	1,03788	1,03788
2300	-0,09743	1,03803	1,03803
2400	-0,01116	1,03818	1,03818
2500	-0,00355	1,03833	1,03833
2600	0,03617	1,03848	1,03848
2700	-0,09721	1,03862	1,03862
2800	0,00776	1,03876	1,03876
2900	-0,10158	1,03885	1,03885
3000	-0,08802	1,03903	1,03903
3100	-0,00754	1,03916	1,03916
3200	0,01633	1,03931	1,03931

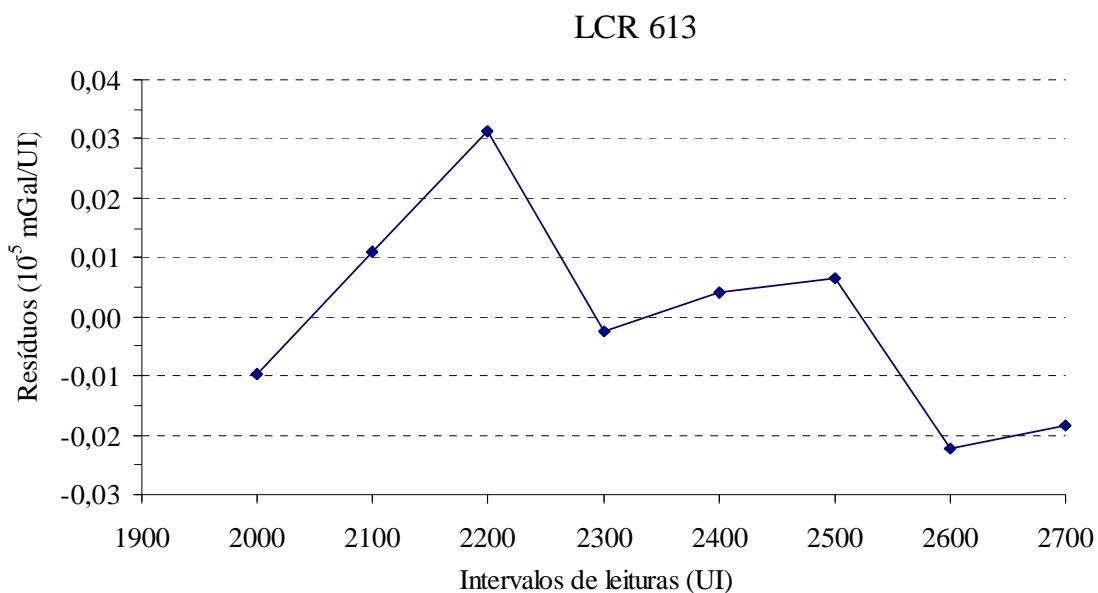


Gravímetro LCR G613

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G613

Número de coeficientes da função de calibração: 8

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2000	-0,00958	1,01762	1,01762
2100	0,01112	1,01773	1,01773
2200	0,03125	1,01785	1,01785
2300	-0,00250	1,01796	1,01796
2400	0,00397	1,01807	1,01807
2500	0,00645	1,01819	1,01819
2600	-0,02222	1,01831	1,01831
2700	-0,01847	1,01842	1,01842

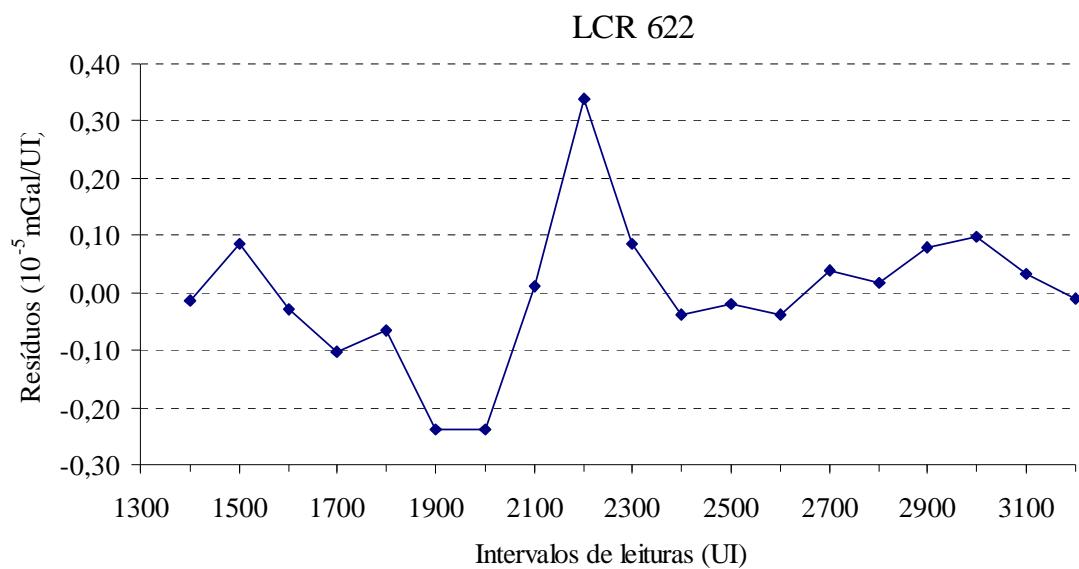


Gravímetro LCR G622

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G622

Número de coeficientes da função de calibração: 19

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1400	-0,01212	1,01912	1,01912
1500	0,08493	1,01920	1,01920
1600	-0,02813	1,01929	1,01929
1700	-0,10417	1,01939	1,01939
1800	-0,06534	1,01950	1,01950
1900	-0,23700	1,01961	1,01961
2000	-0,23816	1,01972	1,01972
2100	0,01243	1,01983	1,01983
2200	0,33807	1,01994	1,01994
2300	0,08597	1,02007	1,02007
2400	-0,03937	1,02020	1,02020
2500	-0,01833	1,02033	1,02033
2600	-0,03637	1,02046	1,02046
2700	0,03948	1,02061	1,02061
2800	0,01681	1,02076	1,02076
2900	0,07893	1,02091	1,02091
3000	0,09831	1,02106	1,02106
3100	0,03451	1,02120	1,02120
3200	-0,01083	1,02133	1,02133

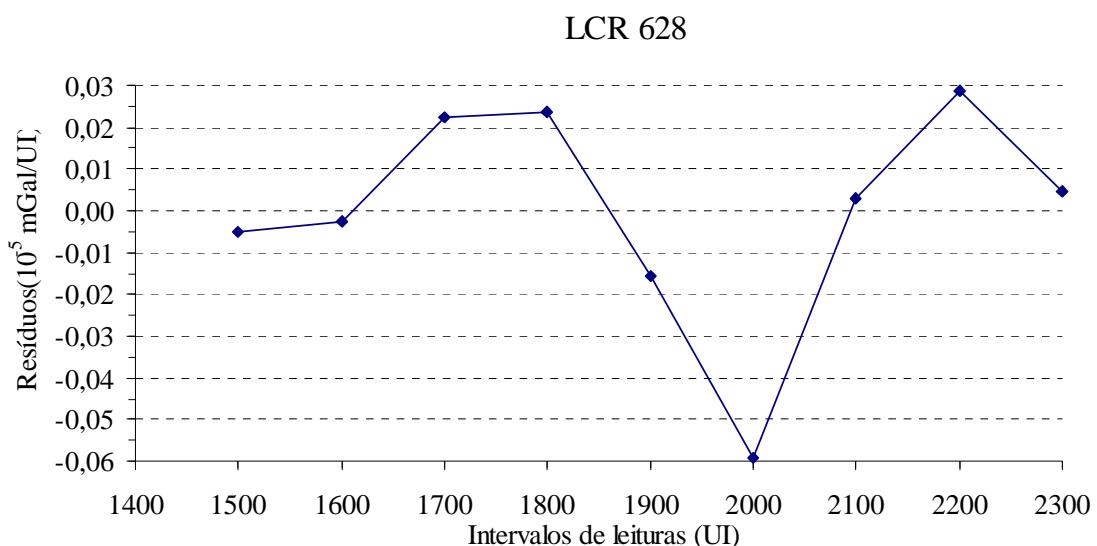


Gravímetro LCR G628

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G628

Número de coeficientes da função de calibração: 9

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1500	-0,00513	1,02073	1,02073
1600	-0,00260	1,02081	1,02081
1700	0,02219	1,02090	1,02090
1800	0,02349	1,02101	1,02101
1900	-0,01552	1,02111	1,02111
2000	-0,05903	1,02122	1,02122
2100	0,00311	1,02133	1,02133
2200	0,02893	1,02144	1,02144
2300	0,00456	1,02156	1,02156

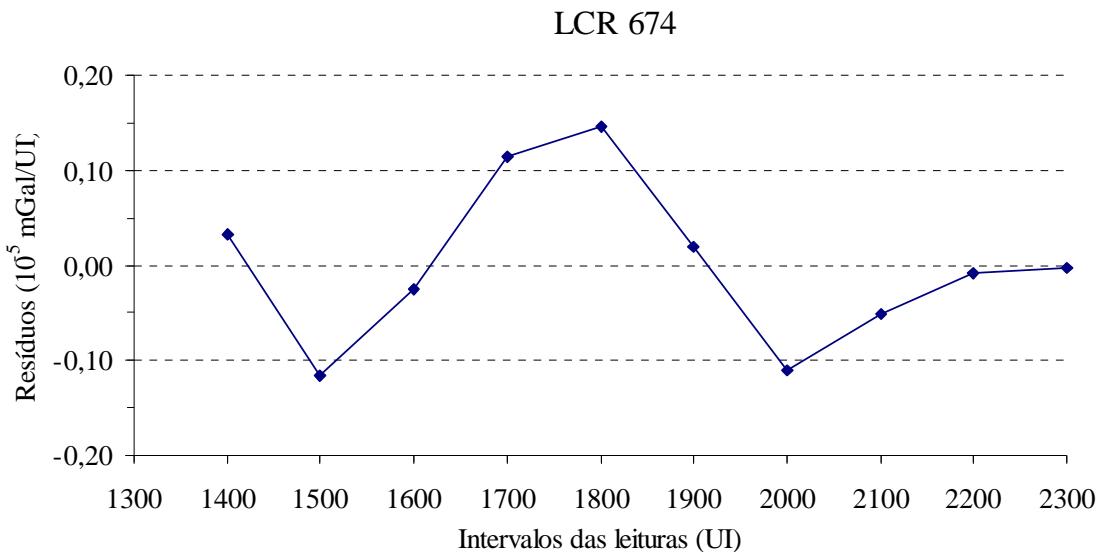


Gravímetro LCR G674

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G674

Número de coeficientes da função de calibração: 10

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
1400	0,03255	1,01200	1,01200
1500	-0,11658	1,01207	1,01207
1600	-0,02455	1,01214	1,01214
1700	0,11415	1,01222	1,01222
1800	0,14570	1,01231	1,01231
1900	0,01953	1,01240	1,01240
2000	-0,11025	1,01249	1,01249
2100	-0,05080	1,01257	1,01257
2200	-0,00747	1,01266	1,01266
2300	-0,00226	1,01276	1,01276

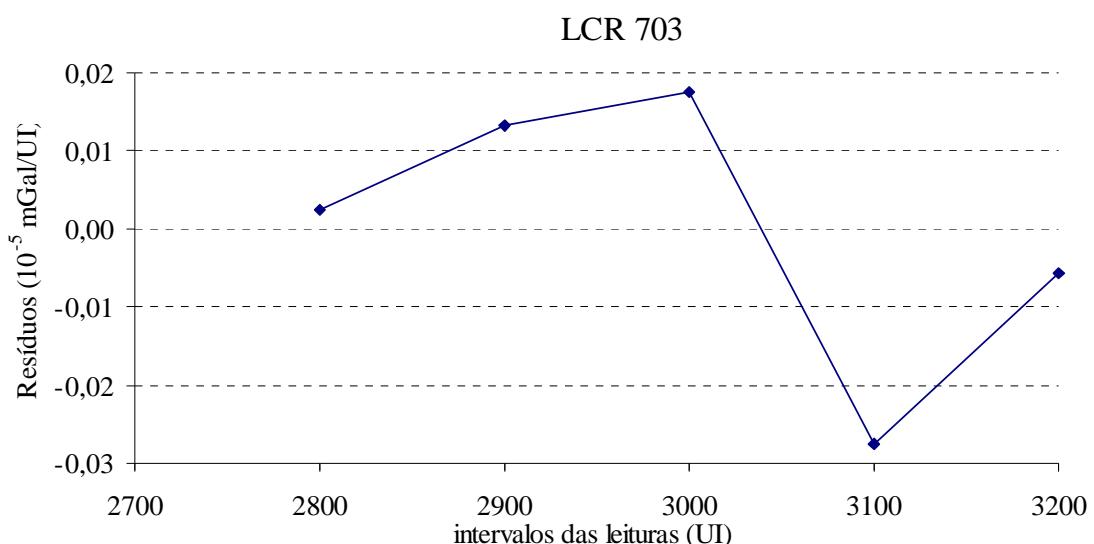


Gravímetro LCR G703

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro LCR G703

Número de coeficientes da função de calibração: 5

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2800	0,00233	1,01868	1,01868
2900	0,01333	1,01885	1,01885
3000	0,01759	1,01905	1,01905
3100	-0,02757	1,01925	1,01925
3200	-0,00567	1,01945	1,01945

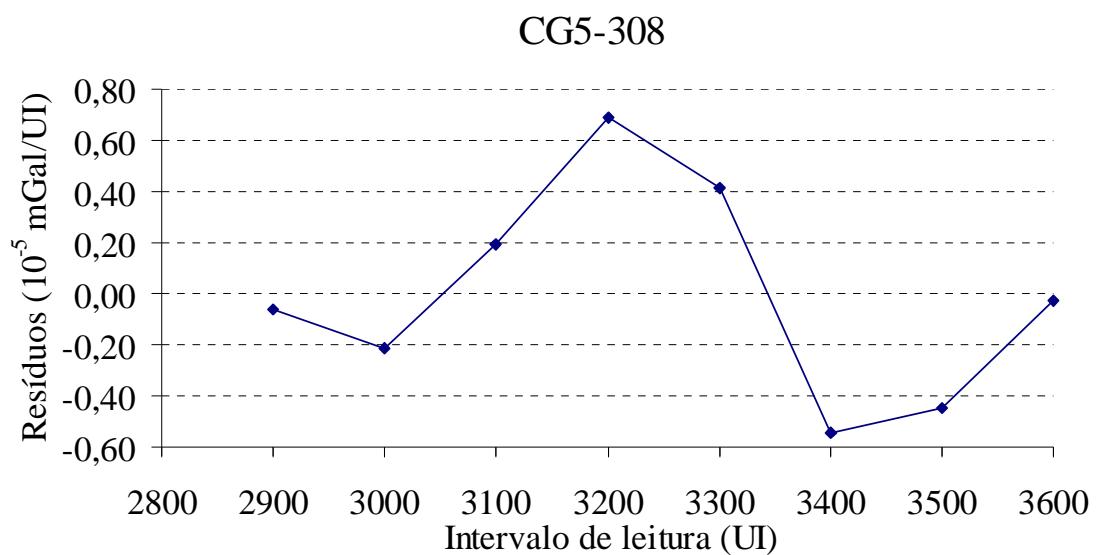


Gravímetro CG5-308

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-308

Número de coeficientes da função de calibração: 8

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2900	-0,06517	1,00000	1,00000
3000	-0,21192	1,00000	1,00000
3100	0,19436	1,00000	1,00000
3200	0,68917	1,00000	1,00000
3300	0,41549	1,00000	1,00000
3400	-0,54469	1,00000	1,00000
3500	-0,44803	1,00000	1,00000
3600	-0,02922	1,00000	1,00000

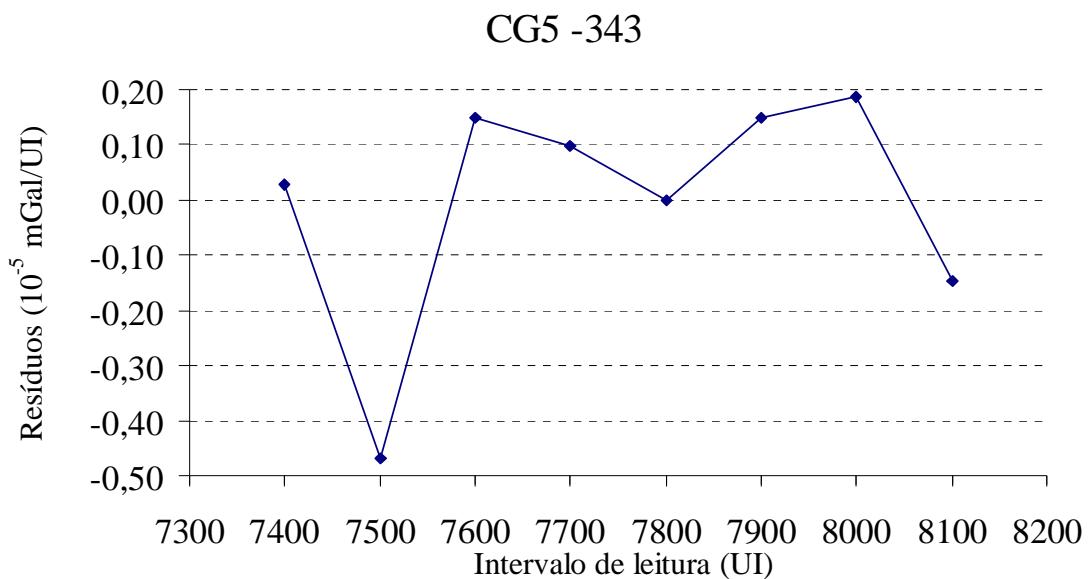


Gravímetro CG5-343

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-343

Número de coeficientes da função de calibração: 8

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
7400	0,02893	1,00000	1,00000
7500	-0,46741	1,00000	1,00000
7600	0,14988	1,00000	1,00000
7700	0,09874	1,00000	1,00000
7800	-0,00001	1,00000	1,00000
7900	0,14959	1,00000	1,00000
8000	0,18718	1,00000	1,00000
8100	-0,14691	1,00000	1,00000

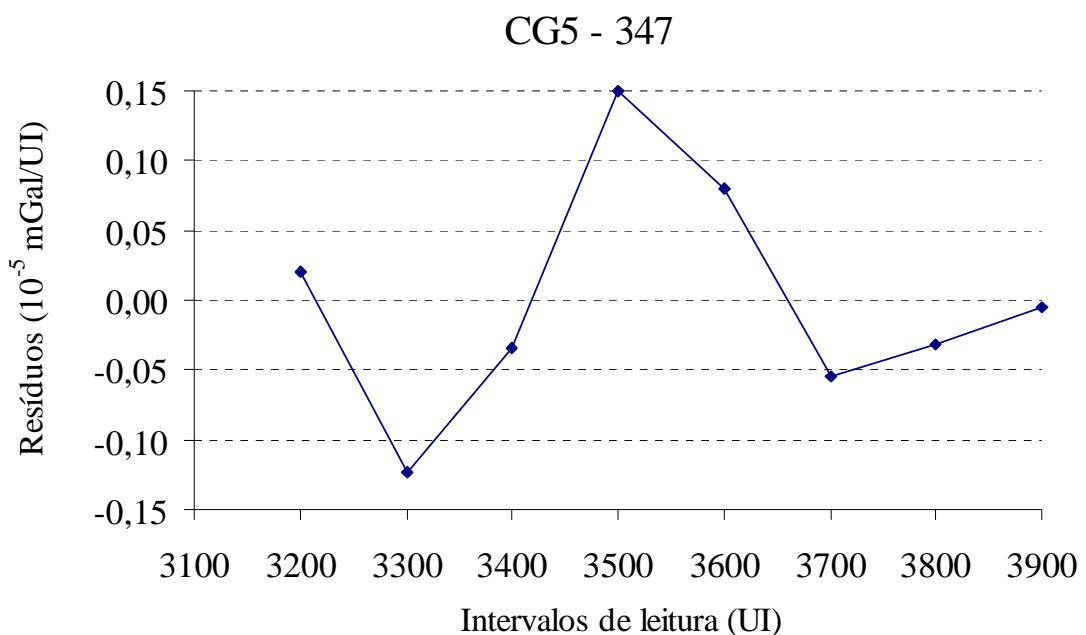


Gravímetro CG5-347

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-347

Número de coeficientes da função de calibração: 8

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
3200	0,02020	1,00000	1,00000
3300	-0,12383	1,00000	1,00000
3400	-0,03473	1,00000	1,00000
3500	0,14948	1,00000	1,00000
3600	0,08057	1,00000	1,00000
3700	-0,05407	1,00000	1,00000
3800	-0,03209	1,00000	1,00000
3900	-0,00553	1,00000	1,00000

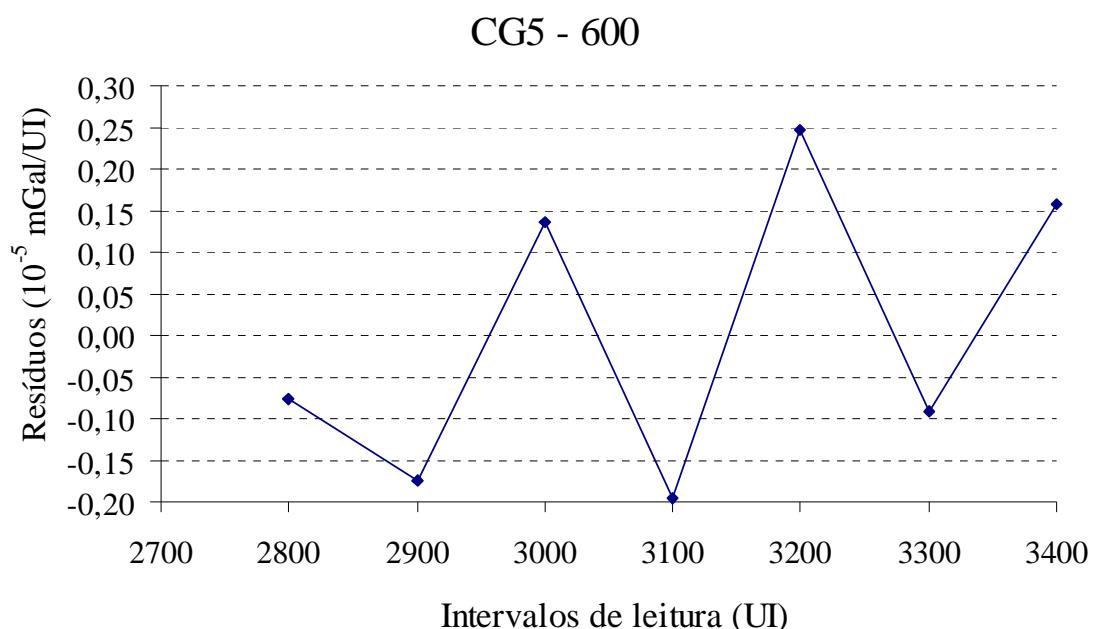


Gravímetro CG5-600

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-600

Número de coeficientes da função de calibração: 7

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2800	-0,07668	1,00000	1,00000
2900	-0,17374	1,00000	1,00000
3000	0,13526	1,00000	1,00000
3100	-0,19637	1,00000	1,00000
3200	0,24605	1,00000	1,00000
3300	-0,09141	1,00000	1,00000
3400	0,15689	1,00000	1,00000



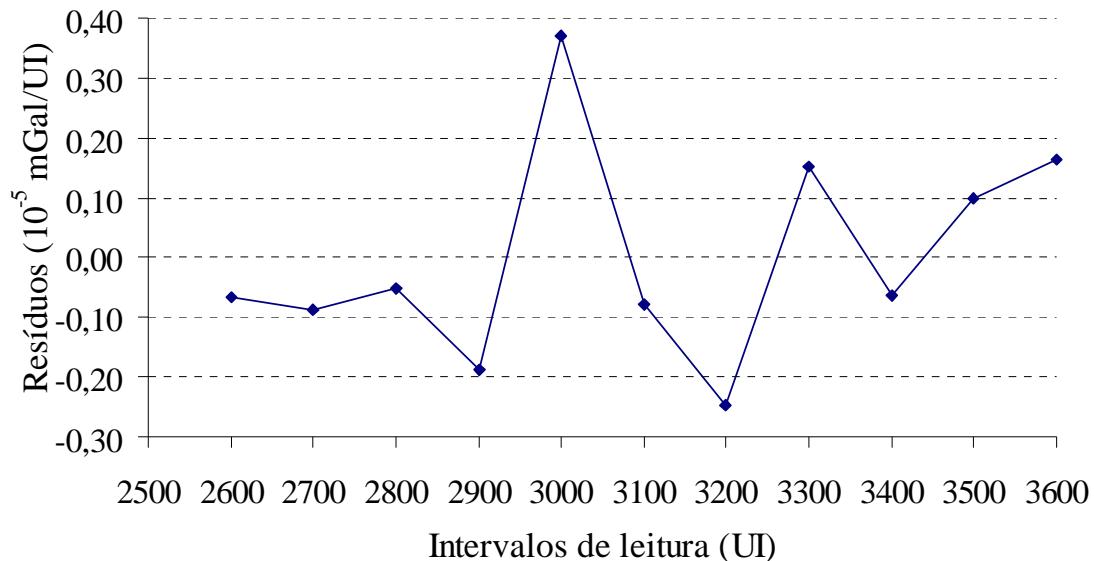
Gravímetro CG5-839

Faixa da tabela de calibração abrangida no trabalho pelo Gravímetro CG5-839

Número de coeficientes da função de calibração: 11

Intervalo da tabela	Resíduos (10^{-5} mGal/UI)	Coeficientes da função de calibração	Coeficientes da função de calibração ajustados
2600	-0,06660	1,00000	1,00000
2700	-0,08591	1,00000	1,00000
2800	-0,05295	1,00000	1,00000
2900	-0,18863	1,00000	1,00000
3000	0,36999	1,00000	1,00000
3100	-0,07922	1,00000	1,00000
3200	-0,24651	1,00000	1,00000
3300	0,15104	1,00000	1,00000
3400	-0,06288	1,00000	1,00000
3500	0,09882	1,00000	1,00000
3600	0,16286	1,00000	1,00000

CG5 - 839



Apêndice III

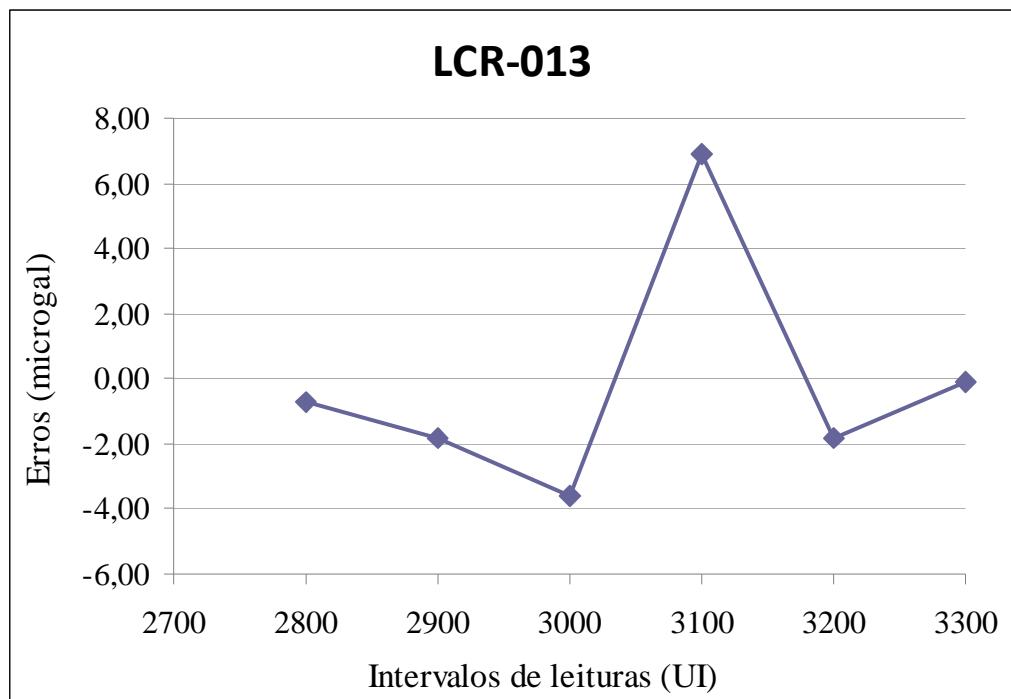
Os valores dos fatores de conversão ao datum gravimétrico local por intervalo, em tabelas e em figuras, estimados no ajustamento para cada gravímetro diferencial LCR e CG5 pelo aprimoramento do modelo D&E.

GRAVÍMETRO LCR G013

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G013 (k_{linear}): 0,998828

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2800	1,04858	0,998821	1,04734	-0,70
2900	1,04868	0,998810	1,04743	-1,80
3000	1,04880	0,998792	1,04753	-3,60
3100	1,04894	0,998897	1,04778	6,90
3200	1,04909	0,998810	1,04784	-1,80
3300	1,04923	0,998827	1,04799	-0,10

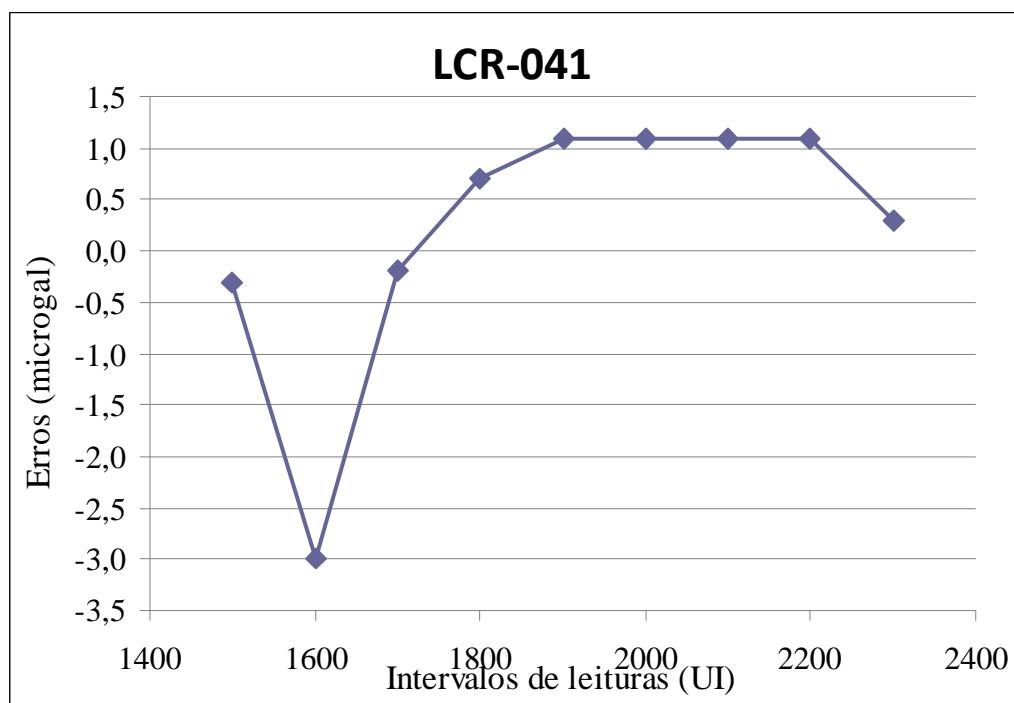


GRAVÍMETRO LCR G041

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G041 (k_{linear}): 0.999814

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1500	1,04335	0,999811	1,04315	-0,30
1600	1,04340	0,999784	1,04317	-3,00
1700	1,04340	0,999812	1,04320	-0,20
1800	1,04335	0,999821	1,04316	0,70
1900	1,04325	0,999825	1,04306	1,10
2000	1,04310	0,999825	1,04291	1,10
2100	1,04335	0,999825	1,04316	1,10
2200	1,04360	0,999825	1,04341	1,10
2300	1,04370	0,999817	1,04351	0,30

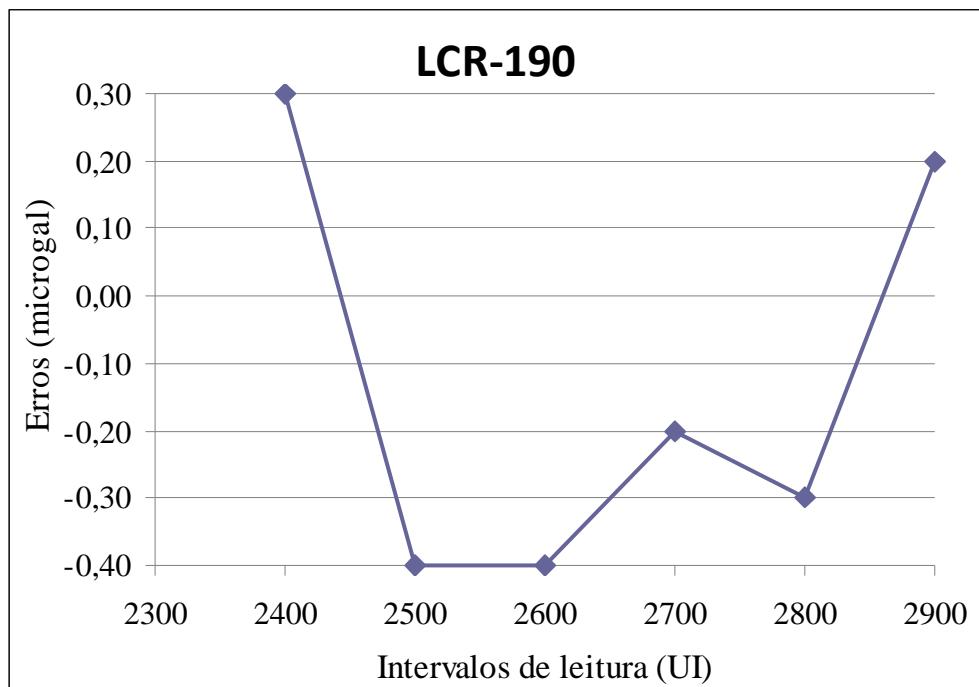


GRAVÍMETRO LCR G190

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G190 (k_{linear}): 0,999946

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2400	1,04834	0,999949	1.04828	0,30
2500	1,04844	0,999942	1.04838	-0,40
2600	1,04855	0,999942	1.04849	-0,40
2700	1,04867	0,999944	1.04861	-0,20
2800	1,04880	0,999943	1.04874	-0,30
2900	1,04894	0,999948	1.04888	0,20

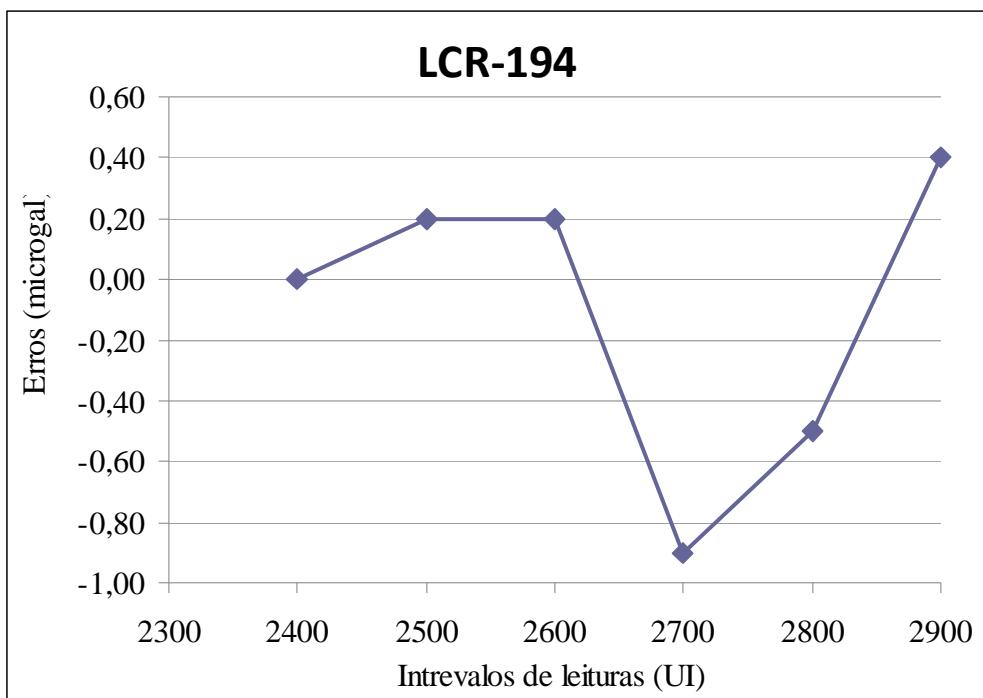


GRAVÍMETRO LCR G194

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G194 (k_{linear}): 1,000245

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2400	1,04624	1,000245	1.04649	0,00
2500	1,04629	1,000247	1.04654	0,20
2600	1,04635	1,000247	1.04660	0,20
2700	1,04642	1,000236	1.04666	-0,90
2800	1,04650	1,000240	1.04675	-0,50
2900	1,04660	1,000249	1.04686	0,40

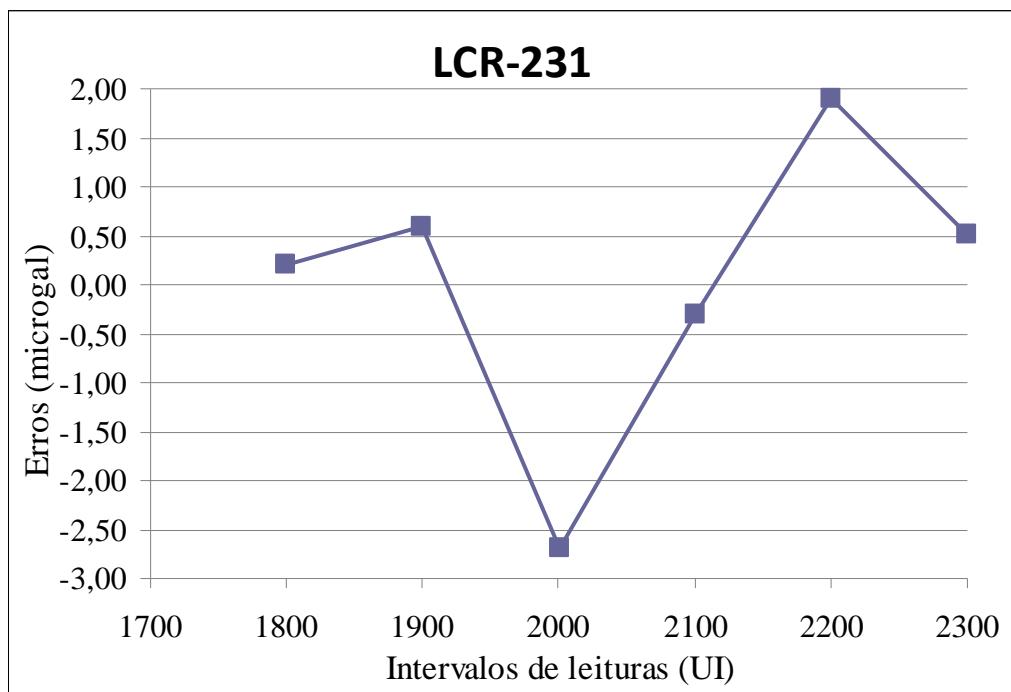


GRAVÍMETRO LCR G231

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G231 (k_{linear}): 1,000560

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1800	1,06070	1,000562	1.06129	0,20
1900	1,06080	1,000566	1.06140	0,60
2000	1,06087	1,000533	1.06143	-2,70
2100	1,06095	1,000557	1.06154	-0,30
2200	1,06102	1,000579	1.06163	1,90
2300	1,06110	1,000565	1.06170	0,50

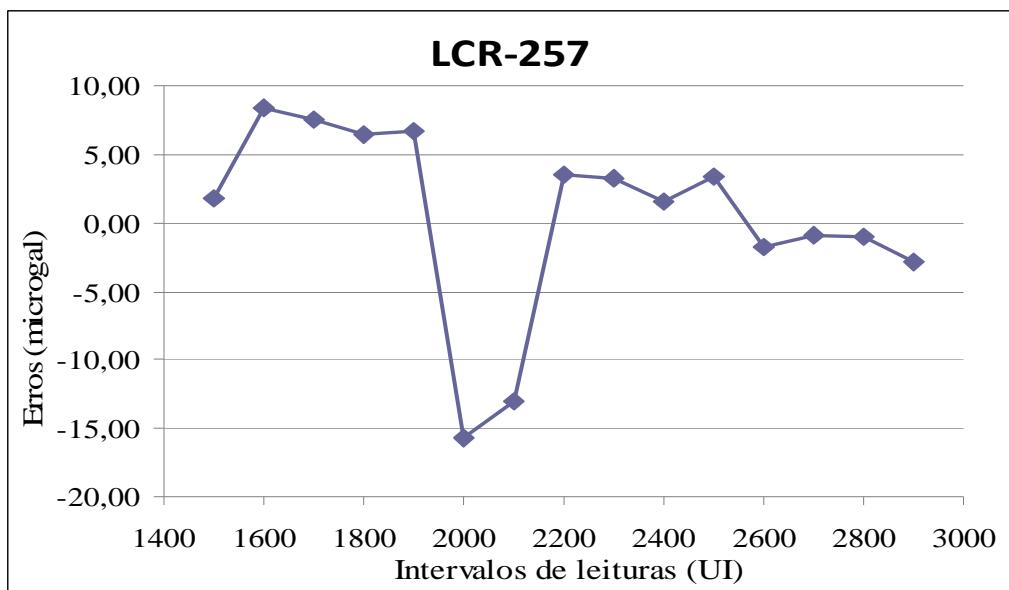


GRAVÍMETRO LCR G257

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G257 (k_{linear}): 1,000330

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1500	1.06792	1,000348	1,06829	1,80
1600	1.06797	1,000414	1,06841	8,40
1700	1.06799	1,000405	1,06842	7,50
1800	1.06803	1,000394	1,06845	6,40
1900	1.06813	1,000397	1,06855	6,70
2000	1.06825	1,000173	1,06843	-15,70
2100	1.06835	1,000200	1,06856	-13,00
2200	1.06843	1,000365	1,06882	3,50
2300	1.06848	1,000363	1,06886	3,30
2400	1.06855	1,000345	1,06891	1,50
2500	1.06864	1,000364	1,06902	3,40
2600	1.06876	1,000312	1,06909	-1,80
2700	1.06888	1,000321	1,06922	-0,90
2800	1.06901	1,000320	1,06935	-1,00
2900	1.06911	1,000302	1,06943	-2,80

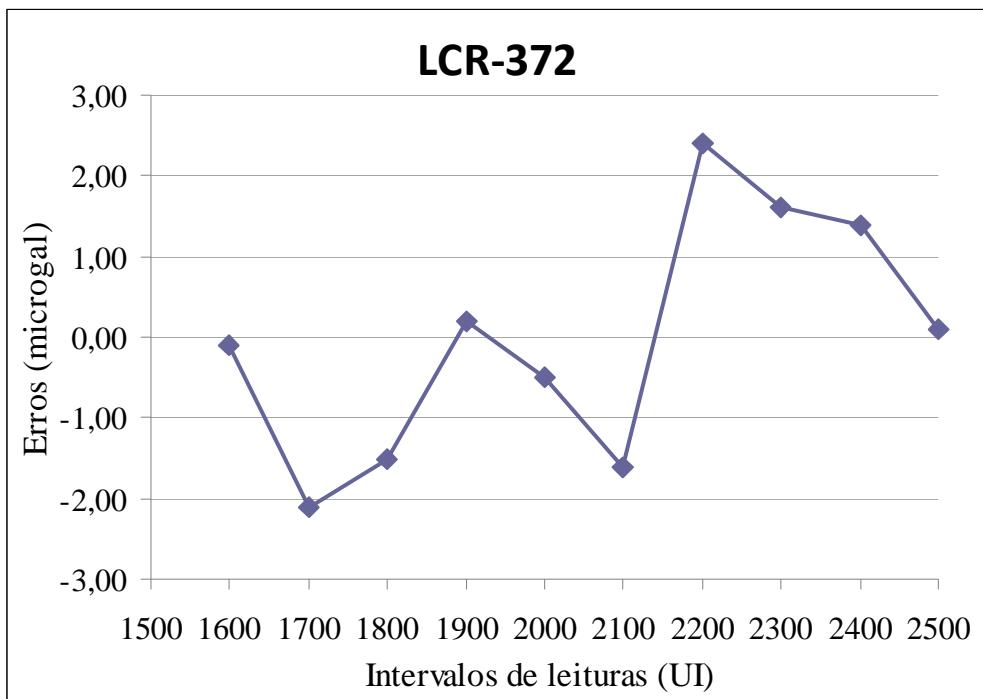


GRAVÍMETRO LCR G372

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G372 (k_{linear}): 1,000475

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1600	1,06776	1,000474	1,06826	-0,10
1700	1,06775	1,000454	1,06823	-2,10
1800	1,06775	1,000460	1,06824	-1,50
1900	1,06776	1,000477	1,06827	0,20
2000	1,06778	1,000470	1,06828	-0,50
2100	1,06780	1,000459	1,06829	-1,60
2200	1,06782	1,000499	1,06835	2,40
2300	1,06785	1,000491	1,06837	1,60
2400	1,06788	1,000489	1,06840	1,40
2500	1,06791	1,000476	1,06841	0,10

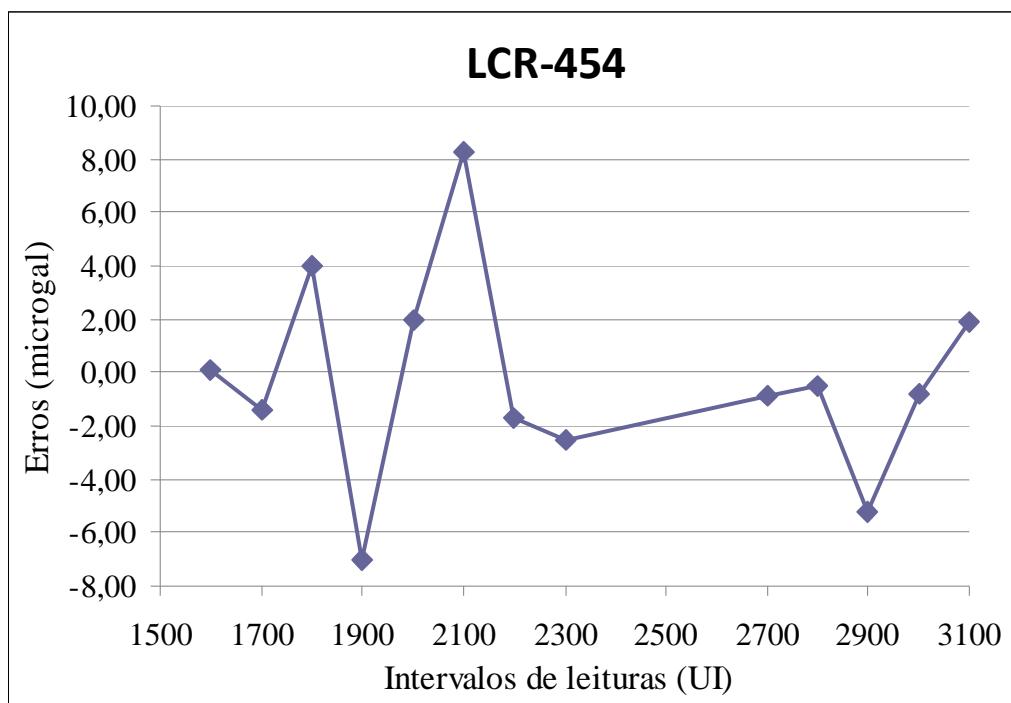


GRAVÍMETRO LCR G454

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G454 (k_{linear}): 1,000318

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1600	1,05047	1,000319	1,05047	0,10
1700	1,05062	1,000304	1,05062	-1,40
1800	1,05077	1,000358	1,05077	4,00
1900	1,05092	1,000248	1,05092	-7,00
2000	1,05108	1,000338	1,05108	2,00
2100	1,05125	1,000401	1,05125	8,30
2200	1,05142	1,000301	1,05142	-1,70
2300	1,05159	1,000293	1,05159	-2,50
2700	1,05238	1,000309	1,05238	-0,90
2800	1,05259	1,000313	1,05259	-0,50
2900	1,05279	1,000266	1,05279	-5,20
3000	1,05300	1,000310	1,05300	-0,80
3100	1,05322	1,000337	1,05322	1,90

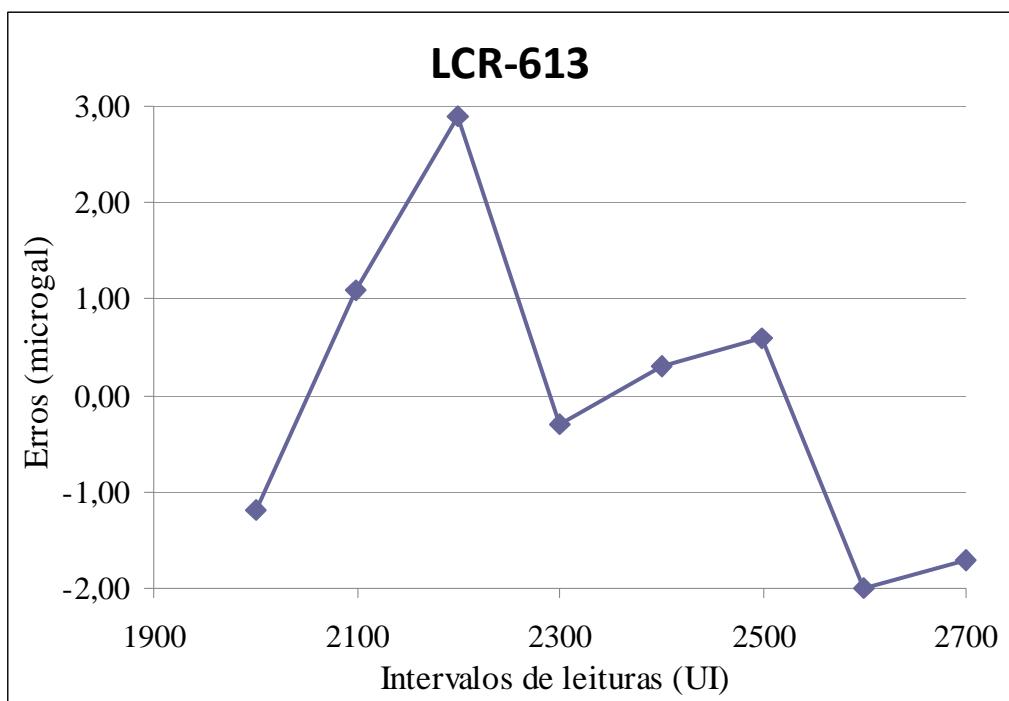


GRAVÍMETRO LCR G613

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G613 (k_{linear}): 0,999906

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2000	1,01762	0,999894	1,01751	-1,20
2100	1,01773	0,999917	1,01764	1,10
2200	1,01785	0,999935	1,01778	2,90
2300	1,01796	0,999903	1,01786	-0,30
2400	1,01807	0,999909	1,01797	0,30
2500	1,01819	0,999912	1,01810	0,60
2600	1,01831	0,999886	1,01819	-2,00
2700	1,01842	0,999889	1,01830	-1,70

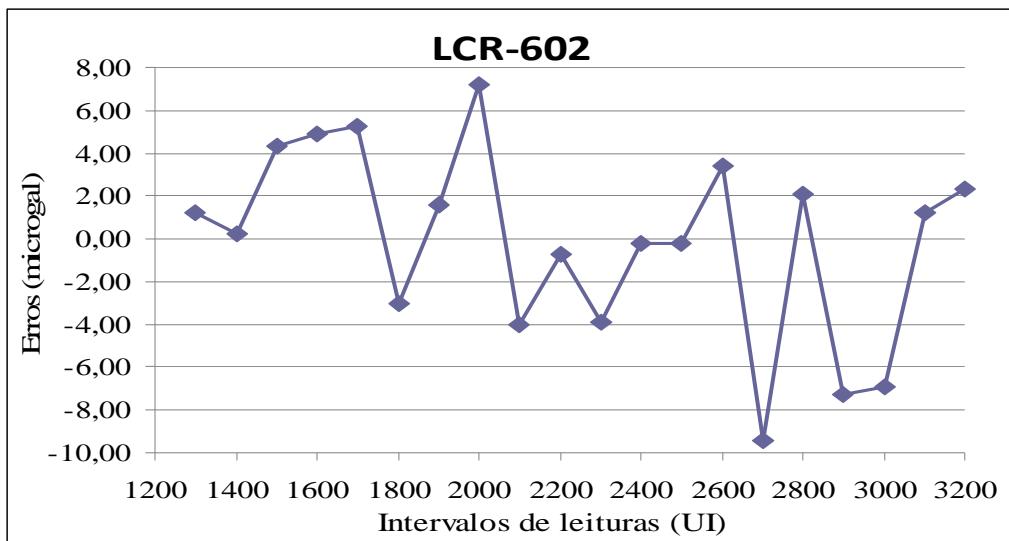


GRAVÍMETRO LCR G602

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G602 (k_{linear}): 1,000396

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1300	1,03667	1,000408	1,03709	1,20
1400	1,03680	1,000398	1,03721	0,20
1500	1,03692	1,000439	1,03737	4,30
1600	1,03705	1,000445	1,03751	4,90
1700	1,03720	1,000449	1,03766	5,30
1800	1,03733	1,000366	1,03771	-3,00
1900	1,03747	1,000412	1,03789	1,60
2000	1,03760	1,000468	1,03808	7,20
2100	1,03775	1,000356	1,03812	-4,00
2200	1,03788	1,000389	1,03828	-0,70
2300	1,03803	1,000357	1,03840	-3,90
2400	1,03818	1,000394	1,03858	-0,20
2500	1,03833	1,000394	1,03873	-0,20
2600	1,03848	1,000430	1,03892	3,40
2700	1,03862	1,000302	1,03893	-9,40
2800	1,03876	1,000417	1,03919	2,10
2900	1,03885	1,000323	1,03918	-7,30
3000	1,03903	1,000327	1,03937	-6,90
3100	1,03916	1,000408	1,03958	1,20
3200	1,03931	1,000419	1,03974	2,30

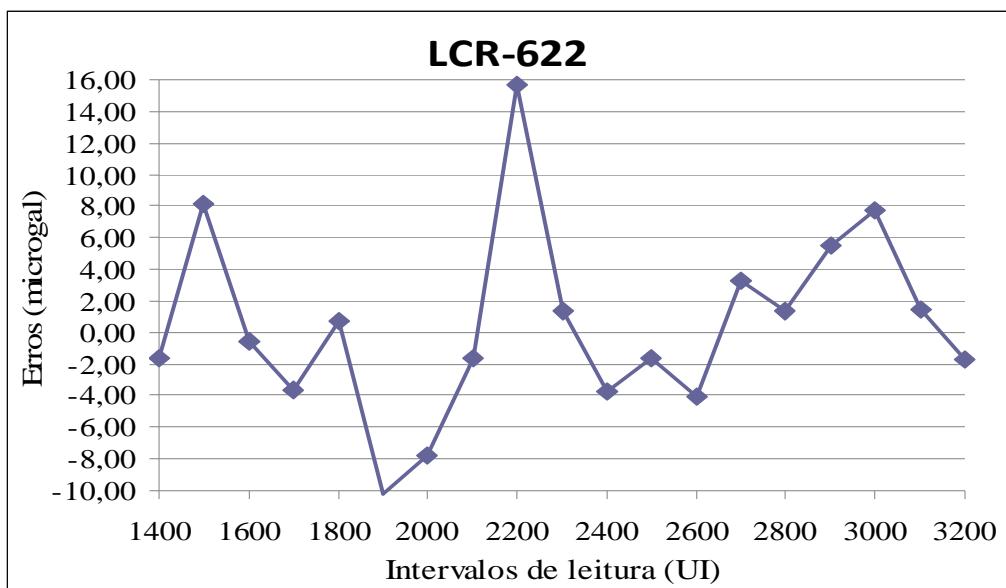


GRAVÍMETRO LCR G622

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G622 (k_{linear}): 1,000434

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1400	1,01912	1,000418	1,01954	-1,60
1500	1,01920	1,000515	1,01972	8,10
1600	1,01929	1,000428	1,01972	-0,60
1700	1,01939	1,000398	1,01979	-3,60
1800	1,01950	1,000441	1,01994	0,70
1900	1,01961	1,000332	1,01994	-10,20
2000	1,01972	1,000356	1,02008	-7,80
2100	1,01983	1,000418	1,02025	-1,60
2200	1,01994	1,000591	1,02054	15,70
2300	1,02007	1,000448	1,02052	1,40
2400	1,02020	1,000397	1,02060	-3,70
2500	1,02033	1,000418	1,02075	-1,60
2600	1,02046	1,000393	1,02086	-4,10
2700	1,02061	1,000467	1,02108	3,30
2800	1,02076	1,000448	1,02121	1,40
2900	1,02091	1,000489	1,02140	5,50
3000	1,02106	1,000511	1,02158	7,70
3100	1,02120	1,000449	1,02165	1,50
3200	1,02133	1,000417	1,02175	-1,70

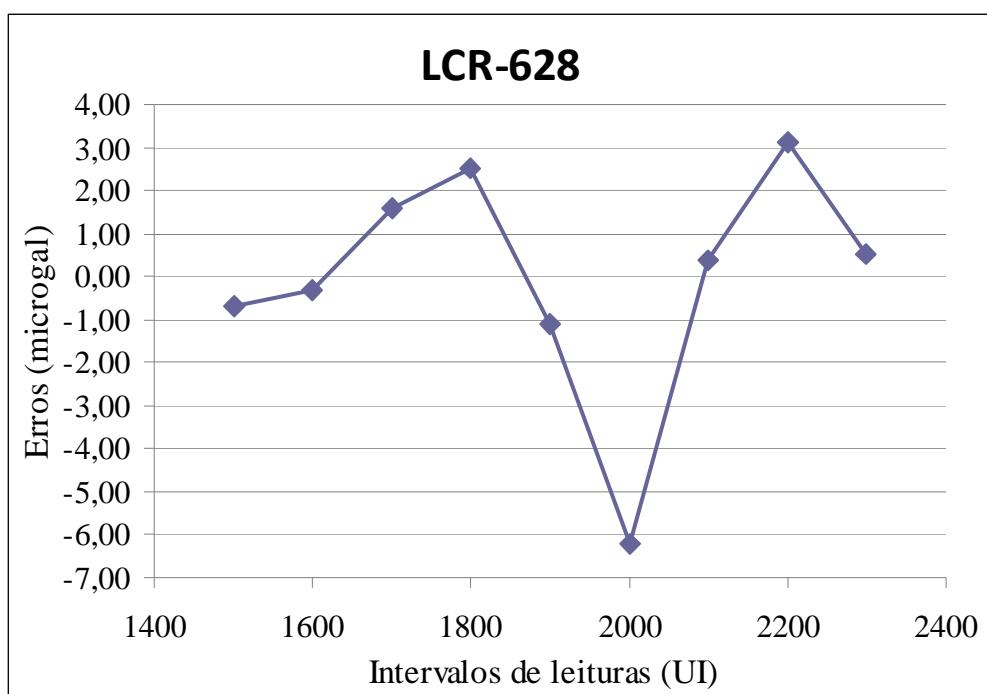


GRAVÍMETRO LCR G628

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G628 (k_{linear}): 1,000454

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1500	1,02073	1,000447	1,02118	-0,70
1600	1,02081	1,000451	1,02127	-0,30
1700	1,02090	1,000470	1,02138	1,60
1800	1,02101	1,000479	1,02149	2,50
1900	1,02111	1,000443	1,02156	-1,10
2000	1,02122	1,000392	1,02162	-6,20
2100	1,02133	1,000458	1,02179	0,40
2200	1,02144	1,000485	1,02193	3,10
2300	1,02156	1,000459	1,02202	0,50

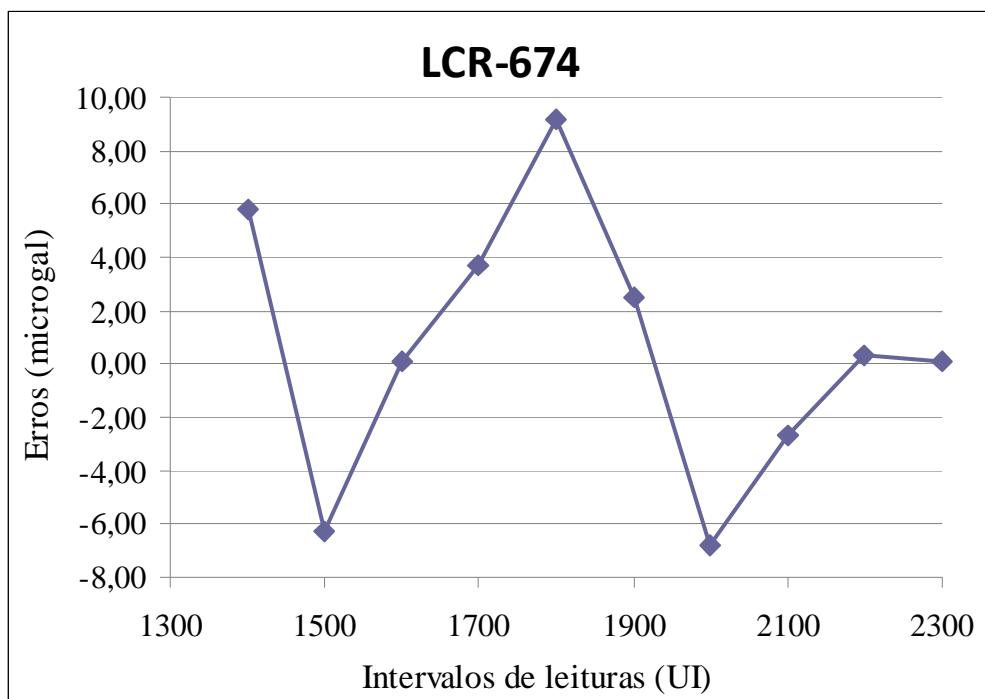


GRAVÍMETRO LCR G674

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G674 (k_{linear}): 1,000461

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
1400	1,01200	1,000519	1,01252	5,80
1500	1,01207	1,000398	1,01247	-6,30
1600	1,01214	1,000462	1,01260	0,10
1700	1,01222	1,000498	1,01272	3,70
1800	1,01231	1,000553	1,01287	9,20
1900	1,01240	1,000486	1,01289	2,50
2000	1,01249	1,000393	1,01288	-6,80
2100	1,01257	1,000434	1,01301	-2,70
2200	1,01266	1,000464	1,01313	0,30
2300	1,01276	1,000462	1,01322	0,10

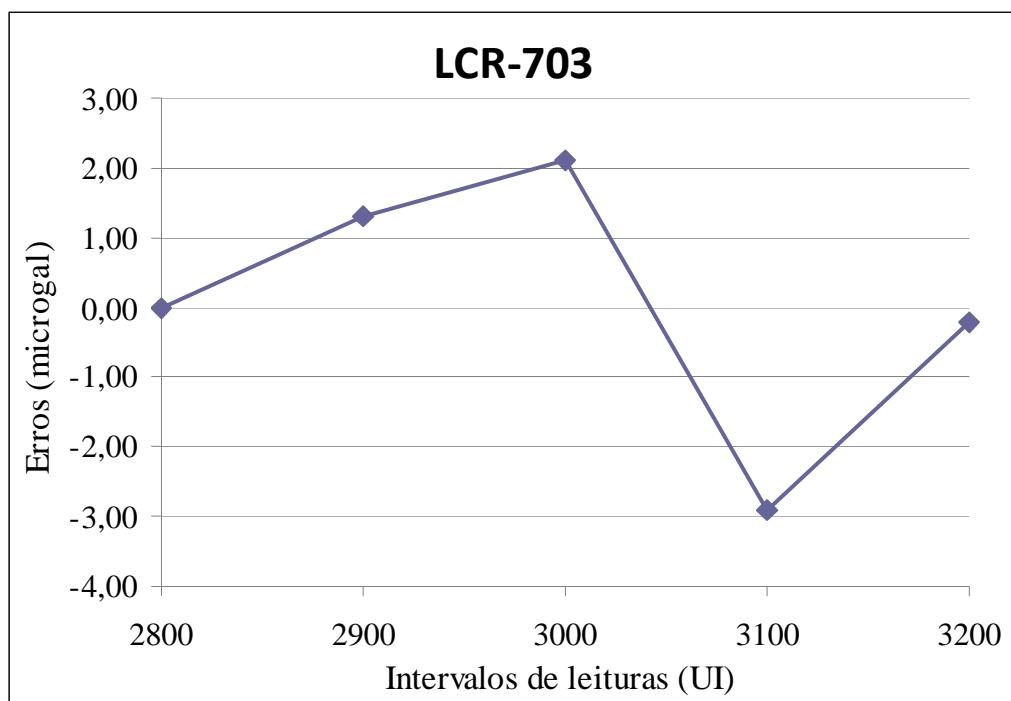


GRAVÍMETRO LCR G703

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro LCR G703 (k_{linear}): 1,000527

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2800	1,01868	1,000530	1,01922	0,00
2900	1,01885	1,000540	1,01940	1,30
3000	1,01905	1,000548	1,01961	2,10
3100	1,01925	1,000498	1,01975	-2,90
3200	1,01945	1,000525	1,01998	-0,20

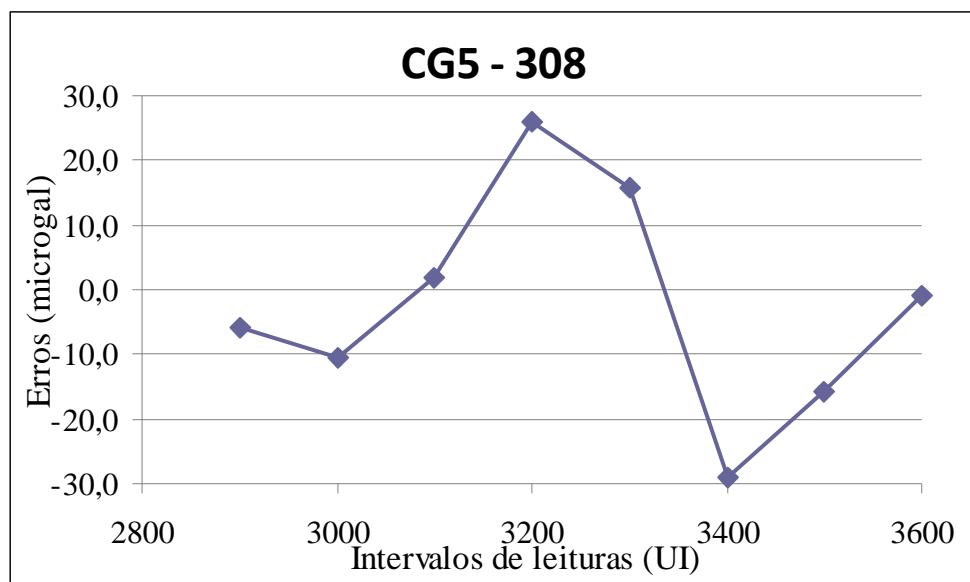


GRAVÍMETRO CG5-308

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro CG5 308 (k_{linear}): 1.001052

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2900	1,000000	1,000993	1,000993	-5,9
3000	1,000000	1,000947	1,000947	-10,5
3100	1,000000	1,001071	1,001071	1,9
3200	1,000000	1,001311	1,001311	25,9
3300	1,000000	1,001211	1,001211	15,9
3400	1,000000	1,000760	1,000760	-29,2
3500	1,000000	1,000895	1,000895	-15,7
3600	1,000000	1,001043	1,001043	-0,9

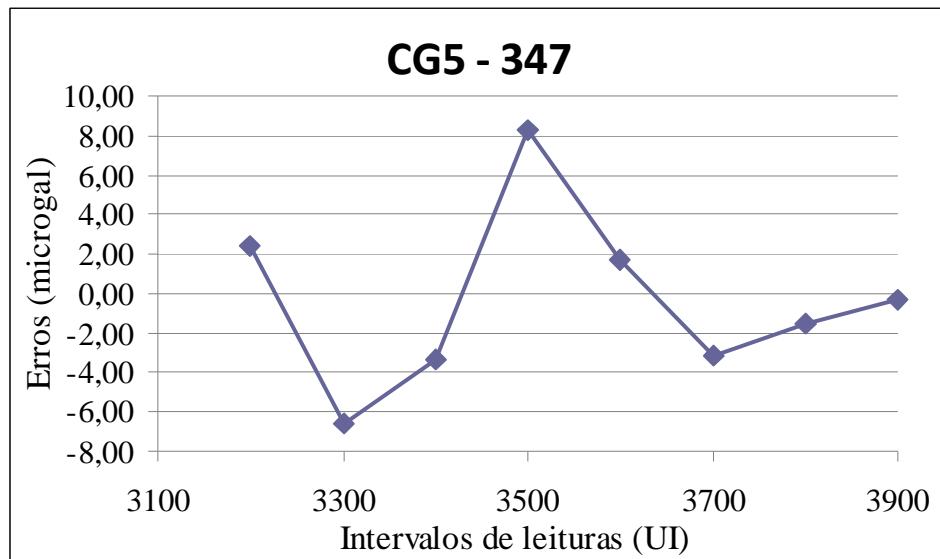


GRAVÍMETRO CG5-347

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro CG5 347 (k_{linear}): 1.000171

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
3200	1,00000	1,000195	1,000195	2,40
3300	1,00000	1,000105	1,000105	-6,60
3400	1,00000	1,000138	1,000138	-3,30
3500	1,00000	1,000254	1,000254	8,30
3600	1,00000	1,000188	1,000188	1,70
3700	1,00000	1,000140	1,000140	-3,10
3800	1,00000	1,000156	1,000156	-1,50
3900	1,00000	1,000168	1,000168	-0,30

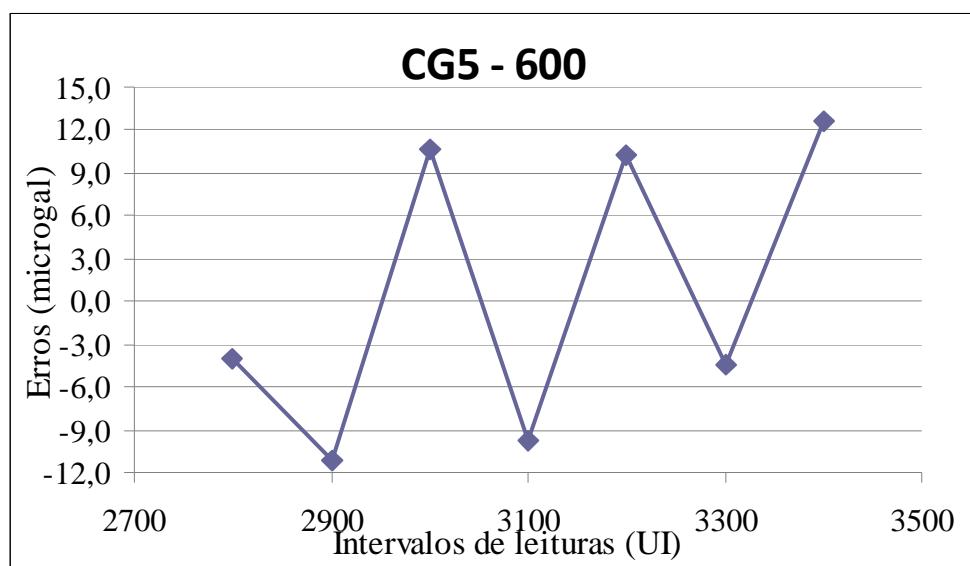


GRAVÍMETRO CG5-600

Fatores de conversão ao datum gravimétrico local

Fator linear de escala do gravímetro CG5 600 (k_{linear}): 0,999752

Leituras (UI)	Coef. de calibração da tabela (mGal/UI)	(κ_i)	Coef. de calibração ajustados (mGal/UI)	Erro (microgal) $10^5 * (\kappa_i - k_{linear})$
2800	1,00000	0,999712	0,999712	-4,0
2900	1,00000	0,999641	0,999641	-11,1
3000	1,00000	0,999859	0,999859	10,7
3100	1,00000	0,999654	0,999654	-9,8
3200	1,00000	0,999855	0,999855	10,3
3300	1,00000	0,999707	0,999707	-4,5
3400	1,00000	0,999878	0,999878	12,6



Referências Bibliográficas

- ANGUS, C. Hamilton, BRULÉ, Bernard G.** “*Vibration-Induced Drift in LaCoste and Romberg Geodetic Gravimeters*”. Journal of Geophysical Research, Vol.72, No.8, 1967.
- BERQUÓ, F.R., ESCOBAR, I.P., PAPA, A.R.R.** “*Ajustamento de observações gravimétricas com precisão de microgal*”. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2011.
- DALMOLIN, Q.** “*Ajustamento por mínimos quadrados*”. Edição revisada. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFFPR. Curitiba. 179p. 2002.
- DIAS, Fernando José Soares e Silva.** “*Um modelo matemático para ajustamento gravimétrico com aprimoramento das funções de calibração dos gravímetros LaCoste e Romberg*”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Pós-Graduação, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 1997, 84f.
- DIAS, Fernando José Soares e Silva, ESCOBAR, Iris Pereira.** “*A model for adjustment of differential gravity measurements with simultaneous gravimeter calibration*”. Journal of Geodesy, 2001, 75: 151-156.
- ESCOBAR, Íris Pereira, DOS SANTOS, Newton Pereira.** “*Ajustamento da Rede Gravimétrica do Observatório Nacional*”, Publicações do Observatório Nacional, nº2, 1980.
- ESCOBAR, Iris Pereira.** “*Rede gravimétrica fundamental brasileira, uma tradição de 10 anos no observatório*”, Revista de Geofísica, No.26, janeiro-junho 1987.
- ESCOBAR, Iris Pereira.** “*Injunções relativas em ajustamento gravimétrico*”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986, 122f.
- ESCOBAR, Iris Pereira.** “*Altitude: Conceituação, Realização, Modelamento Matemático e Ajustamento*.”. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade São Paulo, São Paulo, 1991, 154f.
- ESCOBAR, Iris Pereira, DE SÁ, Nelci Côgo, DANTAS, José Justino, DIAS, Fernando José Soares e Silva.** “*Linha de calibração gravimétrica Observatório Nacional – Agulhas Negras*”. Revista Brasileira de Geofísica, 1996, 14(1): 59-67.
- FARRET, Julio César, DE MORAES, Carlito Vieira, SCHÜNEMANN, Adriano Luis, DOS SANTOS, Rogério Silva.** “*Uma matriz dos pesos alternativa para o ajustamento*

dos nivela mentos diretos". Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v.12, nº1, 2006, 65-86.

FREITAS, S.R.C. "Marés Gravimétricas: Implicações para a Placa Sul-Americana". Tese de Doutorado, Departamento de Geofísica IAG/USP, São Paulo, 1993

GAMA, Lélio I. "Valores da gravidade nas regiões centro e sul do Brasil", Publicação do Programa Gravimétrico N° 4, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 1972.

GAMA, Lélio I. "Extensão da rede do nordeste", Relatório Interno nº 6 ON-MEC, 37 pp., 1973.

GEMAEL, C. "Introdução ao ajustamento de observações. Aplicações geodésicas", Ed. Universidade Federal do Paraná, 319 pp., 1994.

LEDERER, Martin. "Accuracy of the relative gravity measurement". Acta Geodyn. Geomater., Vol.6, No.3(155), 383-390, 2009.

LONGMAN, I.M.. "Formulas for computing the tide acceleration due to the Moon and the Sun". J. Geophys. Res. 64: 2351-2356, 1959.

OLIVEIRA, R., DALMOLIN, Q. "A Influência da Redundância da Observação sobre a Precisão dos Parâmetros". Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, V.14, nº3, p.295-315, jul-set, 2008.

PARSELIUNAS, E., PETROSKEVICIUS, P., BIRVYDIENE, R. and OBUCHOVSKI, R. "Investigation of the automatic gravimeters Scintrex CG-5 and analysis of gravimetric measurements", The 8th International Conference, May 19–20, 2011.

ROSIER, François Albert. "Medidas diferenciais da gravidade: Ajustamento de uma sub-rede de estações gravimétricas e determinação de coeficientes de escala para os gravímetros Lacoste & Romberg modelo G Nº 41, 372 e 454". Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1979, 190f.

SCINTREX. CG5 Scintrex Autograv System Operation Manual, Revision 7, Canada, 2010.

SCHÜLER, T. "Introduction to gravimetry: conducting and processing relative gravity surveys". A brief tutorial", 2000, 15f.

SOUSA, M.A., SANTOS, A.A. "Absolute Gravimetry on the Agulhas Negras Calibration Line". Revista Brasileira de Geofísica, Vol.28(2), 2010.

TORGE, Wolfgang, TIMMEN, Ludger, RÖDER, Rüdiger H., SCHNÜLL, Manfred. "The IFE Gravity Program South America 1988–1991". B299, Deutsche Geodätische Kommission, München, 1994.

VIEIRA, R. CAMACHO, A. G., ORTIZ, E. "Global Adjustment for the Gravity Calibration Line Madrid-Valle de los Caídos". Física de la Terra, 14, 127-159, 2002.

WENZEL H.G. "The vertical gravimeter calibration line at Karlsruhe". Bulletin d'Information Bureau Gravimétrique International, No.78, 47–56, 1996.

YUSHKIN, V.D. “*Operating experience with CG5 gravimeters*”. Measurement Techniques, Vol.54, No.5, August, 2011.

XU, J., ZHU, S., LIU, X., TÖRGE, W., RÖDER, R.H., SCHNÜLL, M., WENZEL, H.G.
“*Vertical Gravimeter Calibration Line Wuhan/China*”. Bulletin d’Information Bureau
Gravimetrique International, No.62, 119-125, 1988.