

A importância da reestruturação da Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras para atender as características dos gravímetros Scintrex CG5.

Francismar Rimoli Berquó, IFF, Itaperuna, Brasil*.

Iris Pereira Escobar, Uerj, Brasil.

Alcides Antônio dos Santos, MCTI/ON, Brasil e Valéria Cristina F. Barbosa, MCTI/ON, Brasil.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

We have restructured the calibration line of the Observatório Nacional-Agulhas Negras aiming at meeting the characteristics of Scintrex CG5 relative gravimeters. We included eight new stations, totaling 13 stations in gravity intervals of about 50 mGal. The new adjustment involving these 13 gravity stations showed better values compared to old adjustment that included only 5 gravity stations. In this new adjustment, we found that the residuals of the instrumental readings vary from -0,006 to -0,00005 UI. The obtained values of the scale linear factors in this new adjustment were better and more accurate than the previous ones, showing that this reorganization improves the development of the relative gravimetry with modern gravimeters.

Introdução

Os modernos gravímetros diferenciais Autograv Scintrex CG5, aqui denominado CG5, possibilitam observações com precisão de 5 microgals (1 microgal= 10 nm/s²), o que significa um aprimoramento de pelo menos uma ordem de grandeza em relação aos instrumentos das gerações anteriores que são os gravímetros diferenciais LaCoste & Romberg.

A natural instabilidade das características do sistema elástico torna necessário submeter os gravímetros CG5, a avaliações e aferições em pontos onde a gravidade seja conhecida (Oja *et al*, 2010). Assim, é possível controlar eventuais variações na escala, bem como verificar o bom funcionamento dos dispositivos que evitam ou compensam os efeitos de variações das condições ambientais nas leituras instrumentais dos gravímetros, notadamente os efeitos relacionados com a variação da temperatura e de pressão atmosférica.

Um dos métodos mais usados para essa investigação é submeter esses instrumentos diferenciais a realizar observações periodicamente em trajetos em que as estações gravimétricas tenham o valor da gravidade conhecido, chamado linha de calibração (Sousa e Santos, 2010; Escobar *et al.*, 1996).

A Linha de Calibração vertical Observatório Nacional – Agulhas Negras (LCONAN) é composta por 5 estações

gravimétricas com uma amplitude de 628 mGal desmembradas em quatro intervalos de gravidade. Com o avanço da gravimetria relativa, esta LCONAN foi aprimorada para atender as necessidades dos gravímetros CG5 que têm resolução de leitura de 1 microgal. Recentemente, a LCONAN foi reestruturada e passou a ter 13 estações gravimétricas distribuídas em 12 intervalos da gravidade com uma amplitude de, aproximadamente, 50 mGal. Segundo Scintrex (2010, p.5.38), o intervalo de gravidade com uma amplitude menor que 100 mGal aumenta a precisão do fator de conversão das leituras instrumentais. Com isso, melhora a investigação para monitorar variações menores nas funções de calibração, que sejam compatíveis ao microgal. Portanto, esperamos que esta reestruturação da LCONAN resulte em leituras com menores resíduos.

A investigação deste aprimoramento da LCONAN, diminuindo a amplitude dos intervalos da gravidade, foi realizada comparando dois ajustamentos da LCONAN. O primeiro utilizando apenas as 5 estações gravimétricas da LCONAN, aqui nomeado de Ajustamento com 5 estações, e por último utilizando as 13 estações gravimétricas distribuídas pelos 12 intervalos da gravidade, aqui nomeado de Ajustamento com 13 estações. Os ajustamentos foram realizados pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) com o modelo matemático linear desenvolvido por Dias e Escobar (2001), aqui denominado modelo D&E. 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 e como grandezas incógnitas os valores de gravidade e os fatores lineares de escala.

Base de Dados: Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras

A LCONAN explora a variação da gravidade com a altitude e também o comportamento desses instrumentos com a variação da temperatura e pressão podendo verificar o bom desempenho dos dispositivos térmicos e barométricos. Após a reestruturação da LCONAN, o número de estações gravimétricas passou a ser 13 com uma amplitude de aproximadamente 50 mGal (Fig.1 e Tab.1). As novas estações gravimétricas foram implantadas tendo o cuidado com a durabilidade, acessibilidade e estabilidade (Fig. 2). Os intervalos CAL2-2 – CAL03 e CAL03 – CAL04 não tiveram uma amplitude de 50 mGal por não existir nenhum lugar durante o percurso que atendesse aos cuidados mencionados acima.

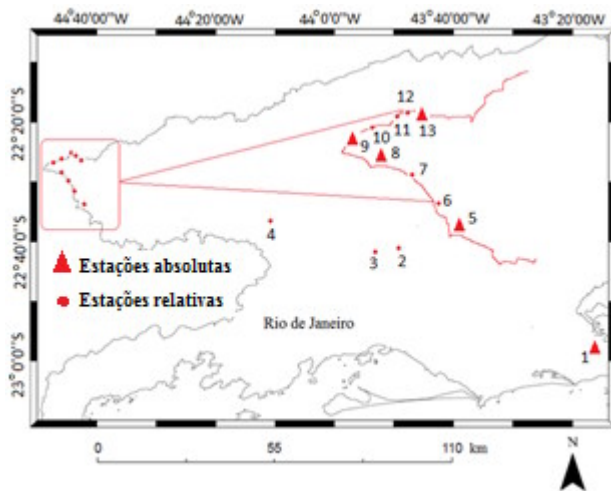


Figura 1 Distribuição das 13 estações gravimétricas (em pontos) da LCONAN: 1 – Rio de Janeiro “C”; 2 – Paracambi1/4; 3 – Obelisco da Serra; 4 – Barra Mansa; 5 – Engenheiro Passos; 6 – km 18; 7 – Capela São José; 8 – Fazenda Lapa; 9 – Marco Zero; 10 – CAL4-2; 11- CAL4-4; 12 – CAL4-5; 13 – Posto do Ibama. A localização das estações gravimétricas absolutas são mostradas pelos triângulos.

Tabela 1. As estações gravimétricas, da LCONAN, os valores dos intervalos da gravidade e as distâncias médias entre as estações gravimétricas.

Código	Localização	Altitude	Δg (mGal)	Distância média
016080	Rio de Janeiro “C”	18 m	47	67km
CAL1-1	Paracambi ¼	65 m	78	16km
CAL1-2	Obelisco na Serra	432 m	19	48km
CAL1-3	Barra Mansa	423 m	47	64km
CAL-02	Engº Passos	500 m	45	7,0km
CAL2-1	km 18	664 m	50	5,0km
CAL2-2	Capela São José	867 m	87	7,0km
CAL-03	Fazenda Lapa	1300 m	94	10km
CAL-04	Marco Zero	1669 m	49	4,0km
CAL4-2	CAL4-2	1910 m	50	4,0km
CAL4-4	CAL4-4	2138 m	49	4,0km
CAL4-5	CAL4-5	2376 m	15	1km
CAL-05	Posto do Ibama	2500 m	-	-

Recentemente, alguns valores absolutos da gravidade nas estações gravimétricas da LCONAN foram determinados com o gravímetro absoluto Micro-g LaCoste A-10#011 (Sousa e Santos, 2010) como mostra a Tabela.2. A estação 016080 teve seu valor da gravidade determinado a partir do transporte do valor da gravidade referente à estação IGSN40123A usando o gravímetro CG5.

Tabela 2. Estações gravimétricas absolutas com seus respectivos códigos, localizações e valores de gravidade de acordo com Sousa e Santos (2010).

Código	Localização	Valores de “g” (mGal)
016080	Rio de Janeiro “C”	978791.665 \pm 0.010
CAL-02	Engenheiro Passos	978601.078 \pm 0.006
CAL-03	Fazenda Lapa	978419.483 \pm 0.009

Código	Localização	Valores de “g” (mGal)
CAL-04	Marco Zero	978325.514 \pm 0.008
CAL-05	Posto do Ibama	978163.000 \pm 0.008



(a)



(b)

Figura 2 Ilustrações das estações gravimétricas da LCONAN (a) CAL2-2 e (b) CAL4-2.

Efeitos nas medidas relativas de gravidade

As leituras efetuadas em um mesmo ponto com um gravímetro diferencial não são iguais. As principais causas das variações nas leituras são: a deriva instrumental e o efeito da maré luni-solar. Neste trabalho, estes efeitos foram corrigidos usando as seguintes metodologias. Para a correção do efeito da maré luni-solar nas leituras instrumentais utilizamos as fórmulas de Longman (Longman, 1959), em UI (Berquó *et al*, 2012). Para o efeito da deriva instrumental, adotamos o procedimento de corrigir este efeito para cada intervalo de gravidade medido por cada gravímetro antes do ajustamento. Adotamos esta metodologia de correção da deriva instrumental pois sabemos que a taxa de deriva depende das condições a que o instrumento é submetido, como por exemplo, variações de temperatura, vibrações, impactos e muitos outros fatores (Angus and Brulé, 1967). Com isso, não se utiliza um valor fixo para a taxa de deriva para todos os intervalos de gravidade. Segundo

Dias e Escobar (2001), a introdução da taxa de deriva como parâmetro é inadequada no modelo matemático para evitar um processo de superparametrização.

Além desses dois efeitos, a Fig.3 ilustra outras correções que o próprio sistema do CG5 aplica nas leituras instrumentais no instante real das medidas quando são selecionadas. A existência da distância entre o seu sensor e a estação gravimétrica, aplica-se a correção da elevação nas leituras instrumentais. Para iniciar um trabalho geofísico o gravímetro CG5, obrigatoriamente, necessita do tripé que o fabricante fornece junto com o instrumento (Fig.4). Esta correção é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta\zeta = \text{Gradiente} \times \Delta h \quad (1)$$

em que $\Delta\zeta$ é a correção dessa elevação, Δh é a distância entre o sensor e a estação gravimétrica e Gradiente são os valores medidos como explicado abaixo.

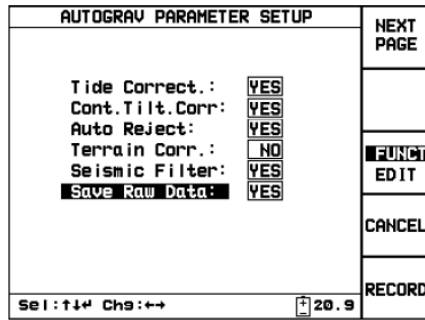


Figura 3 As correções que são fornecidas pelo sistema inerente ao CG5 que podem ser aplicadas nas observações.

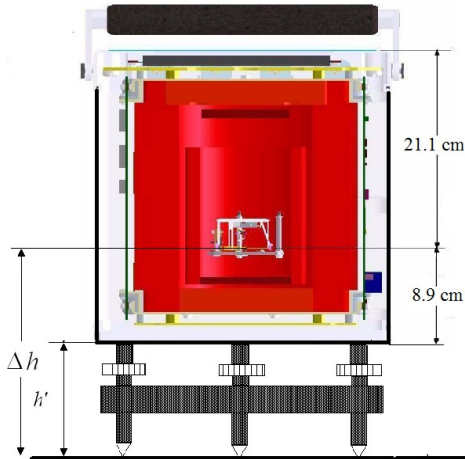


Figura 4 Esquema do gravímetro CG5 em que Δh é a distância entre o sensor e a estação gravimétrica e h' é a distância entre a base do gravímetro e a estação gravimétrica.

O valor da altura h' (em cm) é medido pelo operador antes de iniciar as medidas. Os valores dos gradientes foram medidos da seguinte forma: (i) para as oito novas estações, o operador realizou as medições no local a ser observado e num ponto acima de, aproximadamente, 1 metro de distância utilizando o CG5; e (ii) para as

estações da Tab.2 utilizamos os valores medidos por Sousa e Santos (2010).

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

(i) Os modernos gravímetros possuem dispositivo de compensação da variação da pressão interna e são selados para reduzir os efeitos da variação na pressão atmosférica;

(ii) As leituras instrumentais dos gravímetros não sofrem correções de temperatura, já que o aparelho possui um controle termostático, que mantém a temperatura estável na câmara do sensor.

(iii) 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; 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. Pelo mesmo motivo, a influência da variação da massa atmosférica não foi considerada. De qualquer modo, ao se tratar de medidas diferenciais, realizadas em pontos relativamente próximos ao terreno, a parte comum dos efeitos das massas de água e de ar nos dois pontos de observação adjacentes será compensada.

Modelo matemático para ajustamento de medidas diferenciais da gravidade

O modelo D&E utiliza simultaneamente as leituras instrumentais (l_i), corrigidas da maré luni-solar e da deriva instrumental, os valores de gravidade (g_i), os fatores lineares de escala de conversão ao datum (k_r) para cada um dos gravímetros (r), e os coeficientes das funções de calibração (α_i^r) (Dias e Escobar, 2001), que é:

$$g_i - g_j + k_r(l_j \alpha_j^r - l_i \alpha_i^r) - k_r \delta \left(J \alpha_j^r - I \alpha_i^r - \sum_{m=0}^{J-1} \alpha_m^r + \sum_{m=0}^{I-1} \alpha_m^r \right) = 0 \quad (2)$$

em que I é igual ao número inteiro de intervalos discretizados contidos em l_i $\left(I = \mathfrak{I} \left(\frac{l_i}{100} \right) \right)$, J é análogo a I para a leitura l_j , d é a discretização por intervalo para o coeficiente igual a 100.

O fator de conversão das leituras instrumentais 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 instrumento com o datum gravimétrico local. Esta verificação foi feita utilizando-se o modelo D&E, para cuja aplicação foi construída a Tabela 3, em que 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 3. Parte da tabela construída para os CG5.

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

A solução deste modelo pelo método dos mínimos quadrados requer o conhecimento dos valores de gravidade em pelo menos duas estações. Estes valores foram introduzidos, como injunções relativas, através de um modelo injuntivo secundário (Escobar, 1986):

$$g - \bar{g} = 0 \quad (3)$$

Sendo \bar{g} as observações absolutas da gravidade nas estações de controle e g o valor da gravidade dada pela Eq. (2).

Para compensar as diferentes precisões nas observações consideramos ponderações das grandezas observáveis (Gemael, 1994). A Tabela 4 mostra estas ponderações: (i) as leituras instrumentais são ponderadas com o inverso de suas variâncias; (ii) os coeficientes de calibração são ponderados com o inverso de suas variâncias; e (iii) os valores de gravidade absolutos são ponderados de acordo com o inverso de suas variâncias. Este sistema de ponderação considera a variância da unidade de peso a priori igual a 1 (Tab.5).

Resultados da aplicação do modelo D&E no ajustamento da LCONAN

A LCONAN foi ajustada duas vezes: (i) utilizando a apenas as 5 estações absolutas originais (Sousa e Santos, 2010); e (ii) usando, além destas 5 estações gravimétricas, outras 8 novas estações. Em nenhum dos ajustamentos a hipótese nula foi rejeitada. Com isso, mostra-se a coerência das ponderações envolvidas nos ajustamentos. Confrontando estes valores estimados nos ajustamentos, pode-se investigar se esta reestruturação foi ou não satisfatória.

As Tabelas 4 e 5 mostram os valores usados nos ajustamentos da LCONAN, inclusive as ponderações. Verifica-se que a precisão das leituras instrumentais no ajustamento da LCONAN com 13 estações foi quase igual à precisão de uma leitura do gravímetro CG5.

A variância *a posteriori* no ajustamento da LCONAN com 13 estações ficou muito mais próxima da unidade. Isto indica, inicialmente, que essa reestruturação da LCONAN é de grande importância para esses instrumentos, mais só vamos comprovar a sua importância com os resultados a seguir.

Tabela 4. As ponderações das grandezas observáveis e incógnitas.

		LCONAN	
		5 estações	13 estações
PONDERAÇÕES	Leituras instrumentais	0,010UI	0,006UI
	coeficientes das funções de calibração	10^{-5} mGal/UI	10^{-5} mGal/UI
	Os valores de gravidade	Tabela 2	Tabela 2

Tabela 5. Critérios e valores usados nos ajustamentos e a aplicação do teste global com um nível de significância de 5%.

	LCONAN	
	5 estações	13 estações
Nº de intervalos	12	36
Nº de parâmetros	8	16
Grau de liberdade	9	25
Variância a priori	1,000	1,000
Variância a posteriori	1,102	1,052
Qui-quadrado teórico	[2,70;19,02]	[13,12;40,65]
Qui-quadrado calculado	9,90	26,30

As estações de controle (absolutas) sofreram pequenas correções nos seus valores de gravidade iniciais, mostrando uma coerência entre os dois resultados dos ajustamentos para essas grandezas. Essas correções ficaram dentro de dois desvios padrões. Isto mostra a qualidade desses valores absolutos (Tab.6).

As leituras instrumentais, corrigidas de deriva e maré luni-solar, sofreram correções no ajustamento (Tab.7). Os valores destes resíduos ficaram até 1 desvio padrão das precisões das leituras estabelecido inicialmente (Tab.4). A Tabela 7 mostra que os resíduos referentes à reestruturação da LCONAN (ajustamento com 13 estações) ficaram menores mesmo tendo uma ponderação quase a metade do outro ajustamento.

Tabela 6. Valores de gravidade absolutos após o ajustamento.

Ajustamento da LCONAN com 5 estações				Ajustamento da LCONAN com 13 estações		
Código das estações	Correções (μGal)	Valores de “g” (mGal)	s (mGal)	Correções (μGal)	Valores de “g” (mGal)	s (mGal)
016080	-2,50	978791,662	0,007	2,20	978791,667	0,007
CAL-02	-2,90	978601,075	0,005	-6,70	978601,071	0,005
CAL-03	12,0	978419,495	0,006	12,6	978419,496	0,005
CAL-04	8,60	978325,523	0,006	7,90	978325,522	0,006
CAL-05	-10,4	978162,990	0,007	-8,10	978162,992	0,007

Tabela 7. Os resíduos das leituras instrumentais.

Ajustamento da LCONAN com			
RESÍDUOS		5 estações	13 estações
	MENOR	-0,0008 UI	-0,00005 UI
	MAIOR	-0,007 UI	-0,006 UI

Sousa e Santos (2010) realizaram um trabalho de gravimetria absoluta versus relativa. Comparando os valores estimados por estes autores com os estimados por Escobar *et al* (2013), extraímos uma relação linear entre as escalas dos instrumentos absolutos usados como datum e utilizamos esta relação nesse trabalho.

Os fatores lineares de escala dos gravímetros CG5 foram estimados como parâmetros no ajustamento. No ajustamento da LCONAN, apresentou valores melhores e mais preciso (Tab.8). Escobar *et al* (2013) realizou um trabalho que envolvia estes instrumentos e a escala usada era diferente, ou seja, eram valores absolutos medidos com um gravímetro absoluto Jilag-3. Usando a relação linear entre as escalas absolutas (A-10 e Jilag-3) pode-se verificar que os fatores lineares de escala apresentados pelo ajustamento com 13 estações ficaram mais próximos. Por exemplo, o fator linear de escala do gravímetro CG5-600 que foi ajustado, também por Escobar *et al* (2013), teve o seguinte valor: $0,999752 \pm 0,000042$ e o coeficiente angular da relação linear das escalas absolutas foi: $1,00022397$. Multiplicando esse dois valores, temos: $0,999976$.

Tabela 8. Fatores lineares de escala que foram utilizados como incógnitas no ajustamento.

Ajustamento com			
Scintrex			
CG5	5 estações	13 estações	
	<i>k</i>	<i>k</i>	
343	$1,000762 \pm 0,000050$	$1,000677 \pm 0,000048$	
347	$1,000418 \pm 0,000050$	$1,000418 \pm 0,000048$	
600	$1,000001 \pm 0,000050$	$0,999985 \pm 0,000048$	

O modelo matemático aplicado neste trabalho também admite correção para os coeficientes de calibração dos gravímetros nas faixas de leitura por eles efetivamente utilizadas (Dias e Escobar, 2001). Neste caso, os resíduos ficaram dentro da precisão usada inicialmente no ajustamento para os dois ajustamentos, apresentando o maior resíduo, em módulo, foi $1,5 \cdot 10^{-6}$ mGal/unidade de leitura, que é negligenciável, comparado com a precisão usada no ajustamento 10^{-5} mGal/UI.

Conclusões

Neste trabalho discutimos a importância da reestruturação da Linha de Calibração Observatório Nacional – Agulhas Negras (LCONAN) para atender as características dos gravímetros Scintrex CG5. Esta reestruturação consistiu no aumento do número de estações gravimétricas para um total de 13 estações distribuídas em 12 intervalos da gravidade com uma amplitude de, aproximadamente, 50 mGal.

Mostramos que o modelo D&E é adequado para o ajustamento das observações medidas com os gravímetros Scintrex CG5. Verificamos que os resíduos das leituras instrumentais calculados no ajustamento com 13 estações ficaram menores quando comparados aos ajustamentos realizados anteriormente. Mostramos que os fatores lineares de escala no ajustamento com 13 estações são mais coerentes comparados com os obtidos em trabalhos anteriores e são mais precisos comparados com os do ajustamento da LCONAN com as antigas 5 estações gravimétricas. Ressaltamos que nenhum efeito sistemático foi observado na distribuição dos resíduos estimados para as grandezas observadas.

Provamos neste trabalho que esta reestruturação da LCONAN para um total de 13 estações gravimétricas oferece perfeita condição de uso para aferições dos gravímetros Scintrex CG5. No futuro, pretendemos realizar medidas absolutas nas novas estações gravimétricas para melhorar a investigação da calibração destes gravímetros uma vez que a sua precisão é da ordem do microgal.

Referências

- ANGUS, C.H., BRULÉ, B.G., “Vibration-Induced Drift in LaCoste and Romberg Geodetic Gravimeters”, *Journal of Geophysics Research*, Vol 72, n° 8, 1967.
- BERQUÓ, F.R., ESCOBAR, I.P., PAPA, A.R.R., SANTOS, A.A. “Análise das observações do gravímetro digital Scintrex CG5 na linha de calibração vertical Observatório Nacional - Agulhas Negras”, V

Simpósio Brasileiro de Geofísica – SBGF, 2012.

DIAS, F.J.S.S., ESCOBAR, I.P., “A model for adjustment of differential gravity measurements with simultaneous gravimeter calibration”, *Journal of Geodesy* 75: 151-156, 2001.

ESCOBAR, I.P. “Injunções relativas em ajustamento gravimétrico. Publicação do Observatório Nacional, dissertação de mestrado, UFPR, Curitiba, PR, Brasil, No.2, 1986.

ESCOBAR, I.P., SÁ, N.C., DANTAS, J.J., DIAS, F.J.S.S. The Observatório Nacional Agulhas Negras gravity calibration line. *Brazilian Journal of Geophysics*, volume 14, número 1, 1996.

ESCOBAR, I.P., BERQUÓ, F.R., PAPA, A.R.R. “Adjustment of Gravity Observations toward a microgal precision”. *International Journal of Geosciences*, 2013, 4, 98-107. doi:10.4236/ijg.2013.41010.

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

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

T. Oja, T. Nikolenko, K. Türk, A. Ellmann, and H. Jürgenson. “Calibration results of different type spring gravimeters from the repeated measurements of Estonian calibration line”. *NKG General Assembly*, 2010.

SILVA DIAS, F.J.S., Um modelo matemático para ajustamento gravimétrico com aprimoramento das funções de calibração dos gravímetros LaCoste & Romberg. MSc. Thesis, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 1997.

SOUSA M. A. and SANTOS, A. A. "Absolute gravimetry

on the Agulhas Negras Calibration Line”, *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 28, No. 2, 2010, pp. 165-174.

SCINTREX. CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual, Revision 7, Canada, 2010.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.