

Revista Brasileira de Cartografia (2017), N° 69/2: 253-261
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES DO DESVIO DA VERTICAL PARA ESTABELECIMENTO DE REFERENCIAL BATIMETRICO NA REPRESA DO LOBO, ITIRAPINA - SP

*Determination of Deflection Vertical Components for Assessment of Height
Reference in Bathymetric Surveyor in Lobo Dam, Itirapina – SP*

**Dalva Maria de Castro Vitti¹, Cláudio Bielenki Júnior¹,
Frederico Fábio Mauad¹ & Maurício Roberto Veronez²**

¹Universidade de São Paulo – USP

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC / Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental
Avenida dos Trabalhadores São-carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, CEP 13566-590 São Carlos – SP - Brasil
{dalva, mauadffm}@sc.usp.br; bielenki@terra.com.br

²Universidade do Vale dos Sinos – UNISINOS

Programa de Pós Graduação em Geologia
Av. Unisinos, nº 950, Cristo Rei, CEP 93022-000 - Sao Leopoldo, RS - Brasil
veronez@unisinos.br

*Recebido em 4 de Julho, 2016/ Aceito em 7 de Outubro, 2016
Received on July 4, 2016/ Accepted on October 7, 2016*

RESUMO

O levantamento batimétrico consiste na coleta de profundidades georreferenciadas em leitos submersos. O Referencial altimétrico é necessário para redução das profundidades em altitudes ortométricas. As técnicas para transporte de coordenadas por métodos clássicos são morosas e caras. O GNSS (Global Navigation Satellite System) com correção em tempo real proporciona maior rapidez e confiabilidade na determinação da posição e da altitude elipsoidal. Em locais onde a gravidade é desconhecida pode-se determinar as componentes do desvio da vertical para correção do nivelamento GNSS e assim obter o desnível geométrico de um alinhamento com referência ao geóide local. Nas adjacências da represa do Lobo, entre os municípios de Itirapina e Brotas, São Paulo foi realizado o nivelamento GNSS com receptores Leica GS-15 RTK no método rápido estático com 1000 posições a uma taxa de coleta de 1 segundo e nivelamento geométrico com nível Leica Sprinter 150M de 4 alinhamentos, em que foram determinados os valores das componentes do desvio da vertical ζ e η e a correção a ser aplicada ao nivelamento GNSS. Os valores encontrados foram 1,89" para ζ e 9,84" para η que possibilita a correção do nivelamento GNSS para pontos nivelados a partir da base geodésica EC001, localizada no CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais).

Palavras-chave: Batimetria, Desvio da Vertical, GNSS, Nivelamento.

ABSTRACT

The bathymetric survey consists of collecting georeferenced depths in submerged beds. The height reference reduce depths in orthometric heights. Techniques for transportation coordinated by classical methods are time consuming and expensive. GNSS technology with real time kinematic correction and positioning service for precise point (PPP) provide greater speed and reliability in obtainment the position and geometric height. In places where the gravity is unknown, it can compute the components of vertical deviation and GNSS leveling correction and thus to obtain the

slope of a geometric alignment. We realized GNSS and trigonometric leveling of four alignments in the Lobo Dam, between the municipalities of Itirapina and Brotas, São Paulo, and we determinate the values of the deviation components of vertical ζ “ and η ” and the correction to be applied to GNSS leveling. The values were 1,89 “to ζ ” and 9,84” for η ” which enables the correction of GNSS leveling leveled points from the geodetic base EC001 located in CRHEA (Centre for Water Resources and Studies environmental).

Keywords: Bathymetry, GNSS, Leveling, Vertical Deflection.

1. INTRODUÇÃO

O levantamento batimétrico tem por finalidade a caracterização do relevo do leito submerso e das faixas adjacentes que estão sujeitas a influência da variação do nível d’água em rios, lagos e oceanos. Por meio de uma planta batimétrica, são extraídas informações importantes para a gestão de recursos hídricos como a área inundada e o volume armazenado nas diferentes cotas, bem como a evolução do assoreamento.

A coleta de dados do levantamento batimétrico é realizada por sondagem com ecobatímetro na área molhada em que a definição de um referencial altimétrico no local é imprescindível para conversão das profundidades em altitudes ortométricas.

Para se estabelecer o referencial altimétrico faz-se nivelamento geométrico ou trigonométrico a partir de um referencial de nível (RN) conhecido até o local de trabalho acompanhado de gravimetria. As massas de água se deslocam de acordo com a lei da gravidade. Assim, em levantamentos batimétricos e obras envolvendo o transporte de água, o desnível entre pontos deve representar o sentido do escoamento. O nivelamento geométrico acompanhado de gravimetria é o que garante essa condição (FREITAS & BLITZKOW, 1999; SEVERO *et al.*, 2013; GEMAEL, 1999; GUIMARÃES & BLITZKOW, 2011).

Em levantamento batimétrico, trabalha-se com a altitude elipsoidal (h) devido ao uso do receptor GNSS e com a altitude ortométrica como condição do referencial de nível. A altitude elipsoidal relaciona-se com a altitude ortométrica através do deslocamento entre as superfícies elipsoidal e geoidal, representada pela ondulação geoidal (N) (HEISKANEN & MORITZ, 1984; GEMAEL, 1999). A precisão de h a partir de observações GNSS depende vários fatores como a tecnologia empregada, tempo de rastreamento e método de posicionamento empregado

(SEVERO *et al.*, 2009).

O método de posicionamento GNSS com correção em tempo real (RTK) representou um avanço na determinação precisa da altitude elipsoidal. E, as melhorias realizadas nos modelos matemáticos geoidais global, EGM 2008 (PAVLIS *et al.*, 2008) e brasileiro, MAPGEO2015 deram suporte para aplicação da tecnologia GNSS na determinação da altitude ortométrica. No MAPGEO2015 consegue-se estimar a altitude ortométrica com um desvio padrão de 0,17 metros (IBGE, 2015).

No entanto, a diferença entre altitudes geométricas (elipsoidais) não é semelhante ao desnível entre altitudes ortométricas devido ao não paralelismo entre as superfícies do elipsóide e geóide denotado pelo desvio da vertical. Assim, o desnível entre dois pontos, cujas altitudes foram determinadas por GNSS muito se aproxima do desnível na superfície da Terra entre esses dois pontos, exceto por uma pequena diferença causada pelo desvio da vertical. (GEMAEL, 1999; CEYLAN, 2009).

- Na definição de Molodenski, o desvio da vertical é definido sobre a superfície OU exterior a terra, com a direção da linha de prumo normal até a superfície do quase-geóide, a direção de referência praticamente coincide com a superfície normal.
- Na definição de Helmert, a direção de referência do desvio da vertical é a superfície normal elipsoidal no ponto inicial. Esta difere da anterior por uma leve curvatura (menor que 0,1”) e é preferida porque a normal elipsoidal pode ser fornecida pelas coordenadas geodésicas.
- O desvio da vertical é melhor expressado pela sua magnitude θ e seu azimute ou mais comumente, pelas suas componentes nas direções norte-sul e leste-oeste. Uma derivação geométrica segue a partir da trigonometria esférica sobre a unidade esférica em torno da definição do ponto P. Assume-se que o eixo menor da referência

elipsoidal é paralelo ao eixo Z do sistema de referência global e que o meridiano elipsoidal global é paralelo ao eixo X. Estas condições são compreendidas do ponto de vista dos sistemas de referência modernos e se aproximam aos sistemas geodésicos clássicos (TORGE, 2001).

Para fins práticos, o desvio da vertical é decomposto em duas componentes ortogonais, componente meridiana (ζ'') e componente primeiro vertical (η''). (MOGILEVSKY & MELZER, 1994).

Em locais onde observações gravimétricas não são conhecidas pode-se determinar as componentes do desvio da vertical para diversas aplicações, entre elas, a correção do nivelamento GNSS para aplicação à dinâmica do escoamento (CEYLAN, 2009).

O uso combinado do sistema de navegação por satélite e técnicas terrestres de mensuração para cálculo das componentes do desvio da vertical é bem estabelecido. As técnicas envolvem a mensuração da diferença entre o ângulo zenital geodésico e o ângulo zenital astronômico (SOLER *et al.*, 1989; MOGILEVSKY & MELZER, 1994) ou a determinação da diferença entre o desnível por meio do nivelamento GNSS e nivelamento geométrico (CEYLAN, 2009; CEYLAN & AKKUL, 2009; SANTOS *et al.* 2010; SOUZA & GARNÉS, 2012, SANTOS *et al.*, 2012).

O efeito do desvio da vertical no desnível não é uniforme. Depende do azimute, sendo mais influenciado pelo deslocamento em latitudes do que em longitudes, do comprimento do alinhamento medido e da altitude ortométrica média (SOUZA & GARNÉS, 2012; CEYLAN, 2009).

O cálculo das componentes do desvio da vertical de qualquer ponto pode ser conseguido a partir de valores já determinados para um mínimo de três alinhamentos nivelados e usando o método de ajustamento por mínimos quadrados. E tem validade para o raio em que foi realizado o nivelamento (SOLER *et al.*; 1989; MOGILEVSKY & MELZER, 1994).

Assim, como o objetivo de se estabelecer um referencial altimétrico para apoiar o levantamento batimétrico da represa do Lobo, localizada entre os municípios de Brotas e Itirapina, SP, foi conduzido um estudo para determinar as componentes do desvio da

vertical e as correções a serem aplicadas aos desníveis obtidos no nivelamento GNSS de 4 alinhamentos formados com a base EC001 localizada no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

2. METODOLOGIA

O desvio da vertical (θ) é ângulo formado entre a normal e a vertical de um ponto localizado na superfície física da Terra e por semelhança, corresponde ao afastamento angular entre a superfície geoidal e elipsoidal. Assim, deslocando-se a superfície do elipsóide para o ponto A, o efeito do desvio da vertical é a correção (e_H) a ser aplicada ao nivelamento GNSS para se obter o desnível geométrico na superfície topográfica, Figura 1 e Eq. 1, (HEISKANEN & MORITZ, 1984).

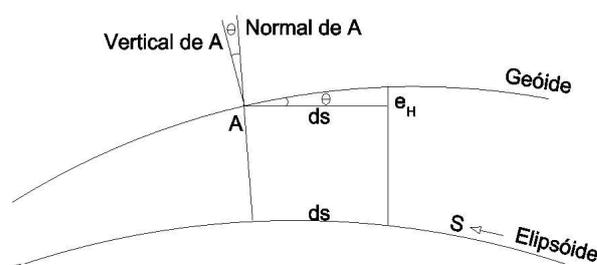


Fig. 1 - Relação entre desvio da vertical no ponto A e o não paralelismo entre geóide e elipsóide (HEISKANEN & MORITZ, 1984 adaptado de CEYLAN, 2009).

$$e_H = \theta \cdot ds \quad (1)$$

em que $\tan \theta = \theta$

O desvio da vertical, θ na direção do azimute (Az) é dada pela equação 2 através das componentes meridiana (ζ'') e 1º vertical (η'') do desvio da vertical do alinhamento nivelado (HEISKANEN & MORITZ, 1984).

$$\theta = \zeta'' \cdot \cos Az + \eta'' \cdot \sin Az \quad (2)$$

O azimute geodésico (Az) e a distância no elipsóide (ds) são determinados a partir das coordenadas geodésicas dos pontos inicial e final da seção nivelada de acordo com Vincenty (1975).

A diferença entre o desnível geométrico e

ortométrico fornecem o valor do deslocamento entre o elipsóide e geóide local (ΔN_i), Eq. 3.

$$\Delta N_i = N_i - N_f \tag{3}$$

Em que:

$$\begin{aligned} N_i &= h_i - H_i \\ N_f &= h_f - H_f \end{aligned}$$

onde $h_i - H_i$ são as altitudes geométrica e ortométrica, no ponto inicial e $h_f - H_f$, as altitudes geométrica e ortométrica no ponto final do trecho nivelado.

Esse desnível dividido pela distância ds fornece o valor inicial de θ para cada trecho nivelado, Eq. 4.

$$\theta = \frac{\Delta N_i}{s_i} \tag{4}$$

Os valores de ζ'' e η'' são obtidos por meio do modelo dado na Eq. 2 e ajustados pelo Método Paramétrico, Eq. 5 e 6 (GEMAEL, 1994). Para o valor inicial das componentes do desvio da vertical adotou-se valor igual a 5'', pois de acordo com Zakatov (1981) até esse valor pode-se garantir a colinearidade entre altitude geométrica e ortométrica.

$$A^T PAX + A^T PL = 0 \tag{5}$$

$$N.X + U = X = -N^{-1}.U \tag{6}$$

A matriz A é composta pelas derivadas parciais da Eq. 2 em relação às componentes do desvio da vertical, X é a matriz das correções e L, os valores estimados da correção devido ao efeito do desvio da vertical.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \zeta''} = \cos Az_i \tag{7}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \eta''} = \sin Az_i \tag{8}$$

Assim,

$$\begin{bmatrix} \cos Az_1 & \sin Az_1 \\ \vdots & \vdots \\ \cos Az_n & \sin Az_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \zeta'' \\ \eta'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta N_1}{s_1} \\ \vdots \\ \frac{\Delta N_n}{s_n} \end{bmatrix}$$

A matriz dos pesos (P), considerando

as observações independentes, é uma matriz diagonal formada pelo inverso da distância em quilômetros de cada trecho nivelado, com $\sigma_0^2 = 1$, conforme Ghilani e Wolf (2006) Eq. 9.

$$P = \sigma_0^2 . S_i^{-1} \tag{9}$$

A estimativa da precisão é dada pela variância a posteriori ($\widehat{\sigma}^2$), Eq. 10:

$$\widehat{\sigma}^2 = \frac{v^T P V}{n-1} \tag{10}$$

Em que V é a matriz dos resíduos dada pela Eq. 11:

$$AX - L = V \tag{11}$$

De acordo com Gemael (1994), a diferença entre σ_0^2 e $\widehat{\sigma}^2$ pode indicar a qualidade do ajustamento e a verificação é feita por meio do teste qui-quadrado (X^2) onde se checa se a discrepância é significativa a um certo nível de confiança, neste caso, 5% de confiança. A hipótese nula é de que as variâncias a priori e posteriori são iguais e a hipótese alternativa é de que sejam diferentes, assim tem-se:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_0^2 &= \widehat{\sigma}^2 \\ H_1: \sigma_0^2 &\neq \widehat{\sigma}^2 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\chi_c^2 = \frac{\widehat{\sigma}_0^2}{\sigma_0} (n-1) \tag{13}$$

rejeita-se a hipótese nula, H_0 , a um nível de confiança a, se, Eq. 14:

$$\chi_{(n-1); 1-\frac{\alpha}{2}}^2 > \chi_c^2 > \chi_{(n-1); \frac{\alpha}{2}}^2 \tag{14}$$

logo, aceita-se a hipótese básica se, Eq. 15:

$$\frac{\chi_{(n-1); 1-\frac{\alpha}{2}}^2}{n-1} \leq \chi_c^2 \leq \frac{\chi_{(n-1); \frac{\alpha}{2}}^2}{n-1} \tag{15}$$

2.1 Estudo de Caso

O trabalho foi realizado nas imediações da represa do Lobo, onde quatro alinhamentos foram nivelados a partir do vértice EC001, localizada na estação hidrometeorológica do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais no campus da Escola de Engenharia

de São Carlos, Universidade de São Paulo, até aos vértices P1, P2, Pier, Aratu e ANA como mostrado na Figura 2.

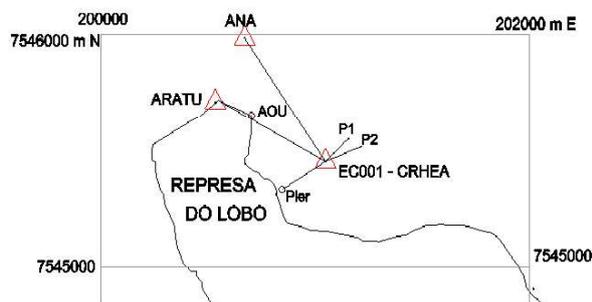


Fig. 2- Alinhamentos EC001- P1, EC001- P2, EC001-ARATU e EC001- ANA onde foram realizados nivelamento GNSS e geométrico.

Os vértices P1, P2 e Pier foram implantados. Já o vértice Aratu corresponde ao marco de referência de nível da represa da PCH (Pequena Central Hidrelétrica) de mesmo nome implantada junto à barragem de concreto e corresponde ao RN para o levantamento batimétrico e o vértice ANA é o referencial da estação fluviométrica do Ribeirão do Lobo monitorada pela Agência Nacional de Águas. O vértice AOU localizado próximo à barragem será utilizado para checagem neste trabalho.

As coordenadas geodésicas (latitude, longitude no SIRGAS2000 do vértice EC001 são conhecidas e as coordenadas dos vértices P1, P2, Pier, AOU, Aratu e ANA foram determinadas por posicionamento diferencial estático com correção em tempo real (RTK) com par de receptor GNSS L1/L2 GS-15 Leica com mínimo de 1000 observações, diluição da precisão de posição < 4, taxa de coleta de 1 segundo.

A ondulação geoidal da área de estudo, de acordo com MAPGEO2015 é igual para todos os pontos, cujo valor é de -6,29 m.

2.2 Nivelamento Geométrico

O nivelamento diferencial nos alinhamentos EC001 aos vértices P1, P2, Pier, Aratu e ANA foi efetuado conforme NBR 13.133/1994 para classe IIN com nível digital modelo SPRINTER 150M da Leica, cuja precisão na altura por km é de 1,5 mm. Os efeitos devido a erros sistemáticos de colimação do nível (e_c), à curvatura da Terra

e refração (e_{cr}), e, erros randômicos relativos a erros de leitura (e_l), de nivelamento do instrumento e mira foram corrigidos (e_{im}), Eq. 16 a 19 (WOLF & GHILANI, 1996).

$$\Delta H = H_{EC001} - H_{pv} - e_c - e_{cr} - e_l - e_m \quad (16)$$

em que:

$H_{EC001} - H_{pv}$, é o desnível no alinhamento formado pelo vértice EC001 até os pontos visados P1, P2, Pier, Aratu e ANA.

$$e_c = \alpha (\sum D_{ré} - \sum D_{vante}) \quad (17)$$

$$e_{CR} = \frac{CR}{1000^2} \cdot (\sum D_{ré}^2 - \sum D_{vante}^2) \quad (18)$$

CR é uma constante e vale 0,0675 para distâncias em metros e D a distância horizontal das visadas de ré e vante.

O erro de leitura corresponde a taxa do erro padrão na leitura da régua por comprimento de visada. O erro de nivelamento do instrumento é especificado nos dados técnicos do mesmo. E, o erro de leitura na mira devido a não verticalidade está presente em todas as leituras de ré e vante, conforme Eq. 19.

$$e_m = \frac{d^2}{2m} \quad (19)$$

sendo d a quantidade linear que está fora do prumo na leitura do fio médio na mira, m, Eq. 20.

$$d = m \cdot \text{sen } \beta \quad (20)$$

β é o ângulo correspondente a não verticalidade da mira.

O desvio padrão do nivelamento geométrico corresponde aos erros randômicos de leitura da mira nivelamento do instrumento e comprimentos de visadas. Com a Eq. 21, calcula-se o erro padrão no ponto visado e com a Eq. 22, o desvio padrão no nivelamento geométrico:

$$\sigma_{\Delta H_{pv}} = D \sqrt{2N(\sigma_r^2 + \sigma_a^2)} \quad (21)$$

Em que:

β = desvio padrão no ponto visado.

D = distância de visada à ré e a vante;

N = número de vezes que o instrumento foi montado e desmontado no trecho nivelado;

σ_r^2 = desvio padrão na elevação em função da distância medida, $\pm 0,0015$ m/m

σ_a^2 = erro padrão na colimação do instrumento, no caso foi considerado $\pm 2''$

$$\sigma_{\Delta H_{geom}} = \pm \sqrt{\sigma_{\Delta H_{EC001}}^2 + \sigma_{\Delta H_{pv}}^2} \quad (22)$$

2.3 Nivelamento GNSS

Como relatado anteriormente, a altitude elipsoidal dos vértices foi obtida pelo método de posicionamento diferencial estático com correção em tempo real (RTK) com par de receptor GNSS L1/L2 GS-15 Leica com mínimo de 1000 observações, diluição da precisão de posição < 4 , taxa de coleta de 1 segundo.

O desnível do nivelamento GNSS é a diferença das altitudes geométricas dos vértices na seção nivelada, Eq. 23.

$$\Delta h = h_{EC001} - h_{pv} \quad (23)$$

Onde:

Δh = desnível GNSS, m

h_{EC001} = altitude geométrica do vértice, EC001 sendo igual a $726,81 \pm 0,003$ metros.

h_{pv} = altitude geométrica dos pontos visados.

O desvio padrão ($\sigma_{\Delta h}$) dos pontos visados é fornecido diretamente no relatório de processamento GNSS emitido pelo software Leica Geoffice. Assim, o desvio padrão do trecho nivelado é dado pela Eq. 24.

$$\sigma_{\Delta h_{GNSS}} = \pm \sqrt{\sigma_{\Delta h_{EC001}}^2 + \sigma_{\Delta h_{pv}}^2} \quad (24)$$

O desvio padrão em cada trecho nivelado é dado pela Eq. 25.

$$\sigma_{\Delta h_{GNSS-geom}} = \pm \sqrt{\sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{\Delta h}^2} \quad (25)$$

De posse dos valores dos desníveis obtidos por nivelamento GNSS e geométrico foram estimados os valores iniciais e ajustados de para cada alinhamento em função de ζ'' e η'' e determinadas as correções e_H a serem aplicadas ao nivelamento GNSS de acordo com as equações 1 a 11.

RESULTADOS

As posições dos vértices no SIRGAS2000 e os desníveis obtidos por nivelamento GNSS entre o vértice EC001 e os vértices P1, P2, Pier, Aratu e ANA e respectivos erros padrão são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Posição dos vértices (SIRGAS2000), desnível GNSS e desvios padrão da altitude geométrica (elipsoidal), em metros

| Vértice | Coordenadas Geodésicas (SIRGAS2000) | | Desnível GNSS (m) | σ_h (m) |
|------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------|----------------|
| | Lat. (S) | Long. (O) | | |
| EC001 | 22°10'13,5" | 47°53'55,7" | ----- | $\pm 0,003$ |
| P1 | 22°10'13,3" | 47°53'51,9" | -4,687 | $\pm 0,004$ |
| P2 | 22°10'13,3" | 47°53'51,4" | -4,749 | $\pm 0,004$ |
| Pier | 22°10'17,4" | 47°54'02,8" | 22,272 | $\pm 0,008$ |
| Aratu | 22°10'04,8" | 47°54'13,5" | 24,355 | $\pm 0,004$ |
| ANA | 22°09'56,0" | 47°54'08,5" | 38,440 | $\pm 0,003$ |
| AOU ¹ | 22°10'06,8" | 47°54'07,6" | 24,990 | $\pm 0,004$ |

¹ ponto de checagem.

Na tabela 2 são apresentados o desnível ortométrico determinado no nivelamento geométrico, as correções conforme Eq. 13 a 16 e o desvio padrão dado pela Eq. 18 em cada seção nivelada.

A distância elipsoidal e o azimute geodésico calculados pelas fórmulas de Vincenty (1975) e as diferenças do nivelamento GNSS e geométrico, bem como o desvio padrão dos alinhamentos EC001 a P1, P2, Pier, Aratu e ANA são mostrados na Tabela 3.

Tabela 2: Azimutes geodésicos, distância elipsoidal, diferenças da altura geoidal e incertezas no desnível

| Seção Nivelada | Desnível ortométrico (m) | Correções (m) | Desnível corrigido (m) | σ_H (m) |
|----------------|--------------------------|---------------|------------------------|----------------|
| EC001 a | | | | |
| P1 | -4,659 | 0,003 | -4,656 | $\pm 0,002$ |
| P2 | -4,709 | 0,005 | -4,704 | $\pm 0,002$ |
| Pier | 22,220 | 0,008 | 22,212 | $\pm 0,002$ |
| Aratu | 24,300 | 0,012 | 24,288 | $\pm 0,003$ |
| ANA | 38,530 | 0,013 | 38,517 | $\pm 0,003$ |

Tabela 3: Distância elipsoidal, azimute, diferença do nivelamento GNSS e geométrico e desvio padrão nas seções niveladas

| Seção Nivelada | Distância (m) | Azimute (graus decimais) | Diferença nivelamento GNSS e geom. (m) | (m) |
|----------------|---------------|--------------------------|--|-------------|
| EC001 a | | | | |
| P1 | 146,385 | 47,3148983 | -0,031 | $\pm 0,004$ |
| P2 | 159,524 | 51,5283022 | -0,045 | $\pm 0,004$ |
| Pier | 235,882 | 239,209549 | 0,059 | $\pm 0,008$ |
| Aratu | 575,1963 | 297,678725 | 0,067 | $\pm 0,005$ |
| ANA | 650,5756 | 325,661051 | 0,077 | $\pm 0,004$ |

Os valores de ζ'' e η'' foram determinados pela Eq. 5 a 9. Para $\Delta N_{GNSS-geom}$, o valor encontrado para a componente meridiana foi 1,89'' e para a componente primeiro vertical foi -9,84'', assim, o valor de θ para os alinhamentos nivelados é dado pela Eq. 19.

$$\theta = 1,89'' \cdot \cos Az - 9,84'' \cdot \sin Az \quad (19)$$

As correções devido ao efeito do desvio da vertical (e_H) a serem aplicadas ao desnível determinado por nivelamento GNSS entre os vértices EC001 a P1, P2, Aratu e ANA são apresentadas na Tabela 4.

Os desníveis do nivelamento GNSS apresentados na Tabela 1 foram corrigidos dos valores de e_H da Tabela 5. Assim, os desníveis resultantes foram comparados com os desníveis do nivelamento geométrico para os alinhamentos estudados, os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4: Desvio da vertical, correção e_H para os alinhamentos nivelados

| Seção nivelada EC001 a | θ | Correção e_H (m) |
|------------------------|----------------------|--------------------|
| P1 | 8,51'' $\pm 0,48''$ | 0,006 |
| P2 | 8,88'' $\pm 0,44''$ | 0,007 |
| Pier | -9,42'' $\pm 0,30''$ | 0,026 |
| Aratu | -7,84'' $\pm 0,12''$ | 0,025 |
| ANA | -3,99'' $\pm 0,11''$ | 0,013 |
| AOU | 7,46'' $\pm 0,18''$ | 0,015 |

Tabela 5: Desnível GNSS corrigido do efeito do desvio da vertical e_H , desnível ortométrico e a diferença entre ambos

| Seção nivelada EC001 a | $Dh_{\text{corrigido}}$ (m) | DH (m) | Diferença nivelamento GNSS corrig. e geom. (m) |
|------------------------|-----------------------------|--------------------|--|
| P1 | -4,693 $\pm 0,004$ | -4,656 $\pm 0,002$ | -0,037 $\pm 0,004$ |
| P2 | -4,756 $\pm 0,004$ | -4,704 $\pm 0,002$ | -0,052 $\pm 0,004$ |
| Pier | 22,298 $\pm 0,008$ | 22,212 $\pm 0,002$ | 0,086 $\pm 0,009$ |
| Aratu | 24,379 $\pm 0,004$ | 24,288 $\pm 0,003$ | 0,092 $\pm 0,005$ |
| ANA | 38,453 $\pm 0,003$ | 38,517 $\pm 0,003$ | -0,064 $\pm 0,003$ |
| AOU ¹ | 25,004 $\pm 0,004$ | 24,912 $\pm 0,002$ | 0,092 $\pm 0,004$ |

¹ponto de checagem

A variância a posteriori calculada pela Eq. 10 foi de $5,97 \cdot 10^{-7}$, ou seja, próxima de zero, enquanto a variância a priori adotada foi igual a unidade. Assim aplicando o teste qui-quadrado para as variâncias a 5% de confiança e quatro graus de liberdade, tem-se:

$$\chi_c^2 = 2,38 \cdot 10^{-7}$$

$$\chi_{4,0,975}^2 = 0,48$$

$$\chi_{4,0,025}^2 = 11,14$$

Logo, rejeita-se a hipótese básica ao nível de significância de 5%, ou seja, σ_0^2 não é igual a $\hat{\sigma}^2$.

Nota-se que as correções calculadas (e_H) foram menores que as diferenças encontradas entre o nivelamento GNSS e geométrico. Além disso, o resultado do teste para a variância a posteriori

indica que o ajustamento não foi satisfatório. Como relatado por Andrade (2008), o resultado pode ter sido influenciado pelas curtas distâncias, pois nota-se que o modelo converge mais facilmente com distâncias superiores a 1000 metros como apresentado por Ceylan (2009).

CONCLUSÃO

O método combinado de nivelamento nivelamento GNSS e geométrico é uma alternativa para se obter as componentes do desvio da vertical em um ponto. Com as componentes determina-se as correções devido ao efeito desse desvio a serem aplicadas nos desníveis GNSS e assim, determinar o desnível ortométrico.

Neste estudo, as correções devidas ao efeito do desvio da vertical calculadas por este método foram inferiores as diferenças determinadas no nivelamento GNSS e geométrico. Assim, a aplicação das correções no nivelamento GNSS não trouxe diferença significativa na diferença entre nivelamento GNSS e geométrico.

Recomenda-se que experimentos realizados para o fim de determinação das componentes do desvio da vertical por meio de nivelamento GNSS e nivelamento geométrico adotem alinhamentos com mais de 1 Km e diferentes critérios para o posicionamento estático.

Para a finalidade de estabelecimento de referencial altimétrico para batimetria, concluímos que o nivelamento GNSS RTK com 1000 posições, taxa de 1 segundo satisfaz as condições de nivelamento classe IIN da NBR 13.133/ 1994.

AGRADECIMENTOS

Ao grupo de pesquisa do Núcleo de Hidrometria do CRHEA, EESC/USP, aos funcionários Valdomiro e Paulo, à FIPAI – Fundação para Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial e ao Grupo de Pesquisa *Advanced Visualization Laboratory* (VizLab) da Universidade do Vale Rio dos Sinos (UNISINOS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. J. O. **Determinação do Desvio da Vertical Empregando Observáveis da Topografia Clássica e do Posicionamento por Satélites**. Dissertação de Mestrado (Orientador: Dalto Domingos Rodrigues). Universidade

Federal de Viçosa - MG, 2008. 109 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.133 – **Execução de Levantamento Topográfico**. 1994. 35 p.

FREITAS; S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitude e Geopotencial. **IGeS– International Geoid Service**, Bulletin N.9. Milan. June 1999, p. 47 – 62

CEYLAN A. Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement. A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. **Scientific Research na Essay**. Vol 4, 12. 2009. p. 1438-1444.

CEYLAN, M; AKKUL, M. Assesment o Deflection of the vertical components from GPS and leveling measurement. **Journal of Surveing Engineer**. 2009. p. 1 - 13.

FREITAS, S. R. C; BLITZKOW, D. Altitudes e Geopotencial. **IGeS Bulletin** N.9 – International Geoid Service, Milan. June 1999. p. 47-62.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Editora UFPR. Curitiba. PR. 1994. 320 p.

GEMAEL, C. **Introdução a Geodésia Física**. Editora UFPR. Curitiba. PR. 1999. 302 p.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment computations spatial data analysis**. 4 ed. New Jersey, John Wiley and Sons. 2006. 611 p.

GUIMARÃES, G. N., BLITZKOW, D. Problema de valor de contorno da geodésia: uma abordagem conceitual. **Boletim de Ciências Geodésicas**, seção Comunicações/Trabalhos Técnicos, Curitiba, v. 17, no 4, out-dez, 2011. p. 607-624.

HEISKANEN, W. A; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. KTU printing office. 1984. 491 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. MAPGEO 2015. **O Novo Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil, 2015**. Disponível em: << http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm>> Acesso em out. 2016.

MOGILEVSKY, E.; MELZER, Y. Determining Deflection of the Vertical with GPS. **Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS**, Salt Lake City, UT.

1994. p. 371-374 <http://www.soi.gov.il/pap/geodesy/Def-Ver-GPS.pdf>
- PAVLIS, N. K; HOLMES, S. A; KENYON, S. C; FACTOR; J. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). **Journal of geophysical research**, Vol. 117. 38 p.
- SANTOS, M.A; SEIXAS, A.; MOTTA, J. A; SANTOS, A. A. Determinação do Modelo Geoidal local preliminar da RMR e parte do agreste de Pernambuco por meio de GPS/ Nivelamento. **In anais do IV Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife - PE, 06-09 de maio de 2012. p. 1-8.
- SANTOS, J. C; JAMUR, K. P.; CERQUEIRA, J. A. C. Utilização de Altitudes Ortométricas Obtidas Através do Modelo EGM 2008 para Obras De Engenharia. **In Anais III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010 p. 001 – 005.
- SEVERO. T. C.; SOUZA, S. F.; M. M. T; GEHLEN, A. K. ALEKSEI. Estudo das correções gravimétricas para altitudes físicas aplicadas aos desníveis da RAAP. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Sec. Artigos, Curitiba, v. 19, nº 3, jul-set, 2013. p. 472-497.
- SOLER, T.; CARLSON JR. A. E; EVANS, A. G. Determination of vertical deflections using the Global Positioning System and geodetic leveling. **Geophysical Research Letters**. 1989. p. 695-698.
- SOUZA, W. O.; GARNÉS, S. J. S. Determinação dos componentes do desvio da vertical pelo método de Helmert: relacionamento entre nivelamento de precisão com altitude elipsoidal e MAPGEO2010. **In. Anais IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife, PE, maio de 2012. p. 2-7.
- VINCENY, T. Directy and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with aplicacion of nested equations. **Survey Review**. Vol. XXIII, nº 176, 1975. p. 88-93.
- TORGE, W. **Geodesy**. 3rd. Completely revised and extended ed. Berlin; New York; 2001. 452 p.
- WOLF, P. R; GHILANI, C. D. **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. 3rd. John Wiley & Sons, Inc. 1996. 564 p.
- ZAKATOV, P S. **Curso de geodesia superior**. Moscou: editorial Mir, 1981. 635 p.