

ANÁLISE DA QUALIDADE DO DESVIO DA VERTICAL DE MODELOS GLOBAIS DE GEOPOTENCIAL NO POSICIONAMENTO GEODÉSICO HORIZONTAL

ROVANE MARCOS DE FRANÇA¹

IVANDRO KLEIN²

LUIS AUGUSTO KOENIG VEIGA³

¹ Instituto Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Paraná– rovane@ifsc.edu.br

² Instituto Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Paraná– ivandro.klein@ifsc.edu.br

³ Universidade Federal do Paraná– kngveiga@gmail.com

O uso de estação total (ET) para posicionamento geodésico é bastante aplicado, sobretudo em áreas onde o posicionamento por satélites GNSS (Global Navigation Satellite System) possui restrições [1,2,3]. Nestes casos, deve-se considerar o desvio da vertical (DV), pois as medições com ET são referenciadas à vertical do lugar ao invés da normal ao elipsoide. Existem vários métodos de determinação do DV, onde os tradicionais métodos fazem necessárias observações de campo no ponto a ser determinado, seja com observações astronômicas ou com observações gravimétricas, exigindo equipamentos de altíssima precisão para que os resultados sejam satisfatórios. Em função desta dificuldade histórica, esta pesquisa analisou o comportamento mundial do DV e sua qualidade extraídos dos Modelos Geopotenciais Globais (GGM), além do impacto provocado pela negligência e pelas divergências encontradas. O DV é tradicionalmente representado por dois componentes denominados componente primeiro vertical (η) na direção oeste-leste, e componente meridiano (ξ) na direção sul-norte, sendo o valor absoluto do DV a resultante das componentes (θ). Utilizando técnicas para obter informações do campo gravitacional em missões de satélite, observa-se o aumento da qualidade dos GGMs. O GGM EGM96 ganhou grande destaque pela incorporação de dados de várias fontes traduzindo em precisões na ordem de 1 metro nas ondulações geoidais, usando o WGS84 como referencial geodésico e modelos harmônicos esféricos até o grau 360 [4]. Dentre os modelos atuais, o Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) foi o primeiro modelo a apresentar estimativas de um conjunto de anomalias gravimétricas a partir de observações de órbita de satélite, topografia do terreno, altimetria de satélite e observações gravimétricas, sendo também o primeiro modelo completo até o grau 2190 [5]. O modelo XGM2019e usa dados de missões recentes e está bem validado pela comunidade científica. Por intermédio do site do *International Center for Global Earth Models* (ICGEM) é possível obter diversas informações gratuitas dos GGMs [6], incluindo o DV e seus componentes [7], e, atualmente é a maneira mais simples e rápida de obter esses dados, pois não requerem observações de campo possibilitando estimar seu efeito em levantamentos geodésicos com ET. Para isto, é necessário gerar um arquivo de texto contendo latitude, longitude e altitude para carregar no serviço. Usando o XGM2019e, foram extraídos os DV de 2,7 milhões de pontos na superfície emergida, pois são os locais possíveis de se realizar observações com ET. A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam o comportamento mundial de θ . Para quantificar a influência do DV no posicionamento horizontal, foram adotados os valores globais de DV médio (7,1"), percentil 90% (12,8"), percentil 99% (28,6") e máximo (112,5"), em função do ângulo zenital, conforme equação 1 de acordo com [8]. Na Figura 2 é possível observar a influência da magnitude do DV sobre a distância elipsoidal em partes por milhão (ppm) e consequentemente sobre o posicionamento horizontal derivado desta distância. Para analisar a qualidade do DV extraído dos GGMs, foram adotados cerca de 8700 pontos como referência, distribuídos em quatro continentes e 37 países (Figura 3). Estes pontos tiveram as componentes do DV determinados por meio de medições de campo utilizando vários métodos e precisões, mas que permitiram calcular as divergências do EGM96, do EGM2008 e do XGM2019e, para mostrar a evolução da qualidade dos modelos. Os dados foram extraídos a partir do grau máximo de cada modelo. A Tabela 2 e a Figura 4 apresentam as discrepâncias encontradas para cada GGM. A partir destes valores de discrepância, é possível inferir a influência dos erros ao utilizar o DV do GGM no posicionamento geodésico horizontal com ET, adotando a Equação 2 [8]. Com os valores de discrepância do modelo XGM2019e da Tabela 2 (média, percentil 90%, percentil 99% e máximo), foram calculadas a influência dos erros ao utilizar as componentes DV do GGM (Figura 5). A partir do mapeamento global dos valores de DV, identificou-se que $\approx 60\%$ da superfície da Terra emergida tem valores de DV superiores a 5". Existem áreas no globo que apresentam variações no DV de até 60" em 100 km. O valor médio e máximo do DV na superfície da Terra emergida (onde geralmente é possível fazer medições com ET) varia de 7" a 112", produzindo erros de posicionamento horizontal de 12 ppm e 187 ppm, respectivamente (para linhas de visão de até 20° em relação ao horizonte). Através da análise da influência das componentes DV obtidas do GGM no posicionamento geodésico horizontal com ET, concluímos que, na maioria das aplicações práticas, os desvios obtidos são inferiores a 2 ppm. Na Figura 6 observa-se que se negligenciado o DV, ele produzirá mais erros de posicionamento que a precisão

nominal das ET no mercado. É importante notar que grande parte do mundo não possui valores de DV determinados por métodos tradicionais, o que reforça a importância destes resultados, uma vez que os profissionais podem utilizar os modelos GGM gratuitos. No entanto, dependendo da finalidade, devem ser considerados os casos em que as distâncias inclinadas são relativamente longas ou os ângulos zenitais relativamente afastados do horizonte. Pode-se observar uma grande evolução na qualidade dos DVs do EGM96 para o EGM2008, mas do EGM2008 para o XGM2019e os resultados se mostram bem similares (Tabela 2 e Figura 4). Portanto, concluímos que a obtenção do DV a partir do GGM atualmente é um método economicamente viável e tecnicamente possível para medições geodésicas com ET em áreas com obstáculos GNSS. Não há restrição em fazer uso do DV dos GGMs, pois os valores podem ser obtidos facilmente e gratuitamente através do ICGEM, sem a necessidade de observações de campo. Ressalta-se que os métodos tradicionais mantêm sua importância para análise e determinação do geoide e aplicações geodésicas mais precisas. Além disso, é de fundamental importância que os softwares de processamento comercial, bem como os softwares internos das ET, levem em consideração os componentes do DV em seus cálculos para compatibilizar as observações com o mesmo referencial de posicionamento GNSS e evitar a propagação de erros sistemáticos, uma vez que este erro pode facilmente superar a precisão linear do equipamento (Figura 6). Para futuras pesquisas, recomendamos a análise adotando a técnica de Modelagem de Terreno Residual, bem como análise de novos GGMs como o esperado EGM2020 [9], bem como observações de DV com câmeras zenitais na Ásia, África e América do Sul. Há também grande expectativa para a melhoria dos futuros GGMs (seguindo o exemplo do EGM2020) devido ao aumento do grau máximo de seu desenvolvimento em harmônicos esféricos, o que trará ganhos de alguns centímetros para determinar anomalias de altura ou ondulações geoidais [10], mas exerceria pouca influência na qualidade dos valores de DV para aplicações práticas com ET. Para uma melhoria substancial no DV, uma mudança considerável no gradiente do geoide teria que ser observada, o que é esperado em GGMs regionais.

Equações

$$\Delta LED_{\theta} = SD \cdot |\cos Z| \cdot \theta \quad (1)$$

Sendo,

ΔLED_{θ} : influência do DV na Distância Elipsoidal;
 SD : distancia inclinada observada;
 Z : ângulo zenital observado;
 θ : valor do DV (radianos).

$$\Delta LED_{\Delta\theta} = SD \cdot |\cos (Z + \theta)| \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

Sendo,

$\Delta LED_{\Delta\theta}$: influência da discrepância do DV na Distância Elipsoidal;
 $\Delta\theta$: discrepância de θ .

Tabelas

Tabela 1 – Estatísticas do θ na superfície da Terra emergida no modelo XGM2019e

θ máximo	112,5"
θ mínimo	0"
θ médio	7,1"
Desvio padrão	±5,4"
1º quartil	3,7"
Mediana	5,8"
3º quartil	8,8"
Percentil 90%	12,8"
Percentil 99%	28,6"

Fonte: extraído de [11]

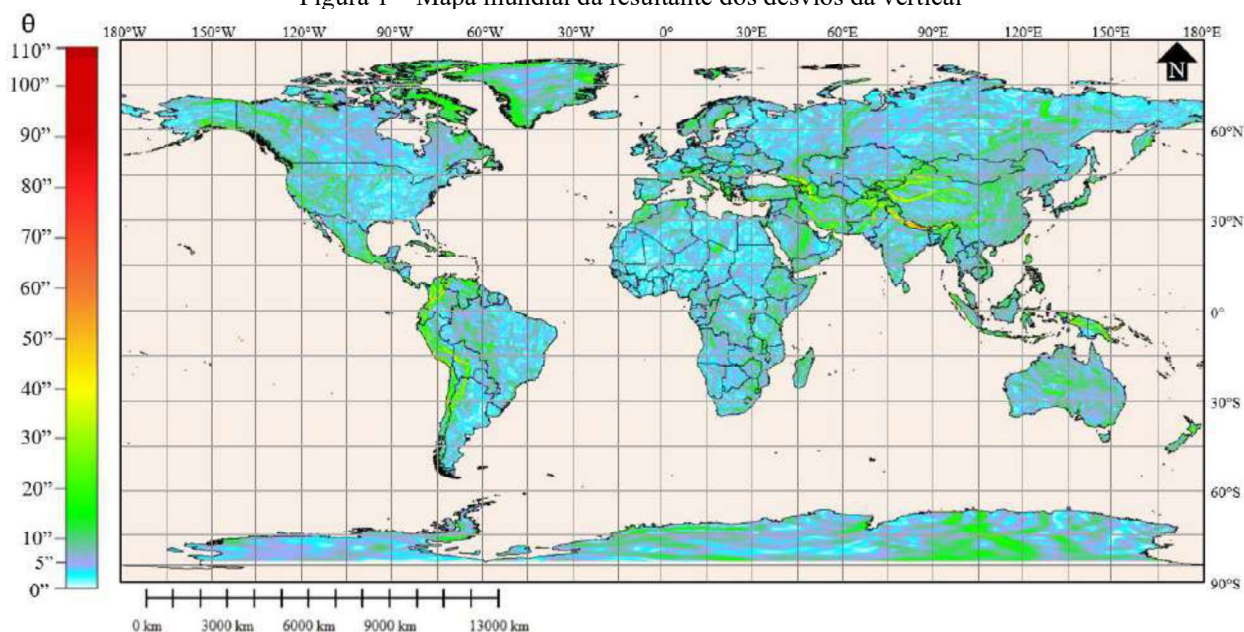
Tabela 2 – Discrepâncias do ξ , η e θ em relação ao observado em campo

VARIÁVEL	$\Delta\xi$			$\Delta\eta$			$\Delta\theta$		
	EGM96	EGM2008	XGM2019e	EGM96	EGM2008	XGM2019e	EGM96	EGM2008	XGM2019e
máximo	25,8"	13,3"	11,1"	20,6"	13,1"	11,7"	27,6"	12,0"	12,3"
mínimo	-18,1"	-5,4"	-2,2"	-19,2"	-12,2"	-12,1"	0,0"	0,0"	0,0"
médio	0,2"	0,2"	0,2"	-0,1"	0,1"	0,1"	2,3"	1,0"	1,2"
desvio padrão	3,0"	1,4"	1,5"	3,5"	1,8"	1,9"	2,7"	1,4"	1,4"
1º quartil	-1,2"	-0,5"	-0,6"	-1,3"	-0,4"	-0,6"	0,6"	0,2"	0,3"
mediana	0,1"	-0,0"	0,0"	0,1"	0,1"	0,1"	1,3"	0,6"	0,7"
3º quartil	1,4"	0,5"	0,7"	1,4"	0,7"	0,9"	2,9"	1,2"	1,5"
percentil 90%	3,4"	1,5"	1,8"	3,3"	1,7"	2,0"	5,5"	2,6"	2,9"
percentil 99%	9,2"	6,0"	6,5"	10,0"	5,9"	6,1"	12,6"	7,1"	7,6"

Fonte: extraído de [11]

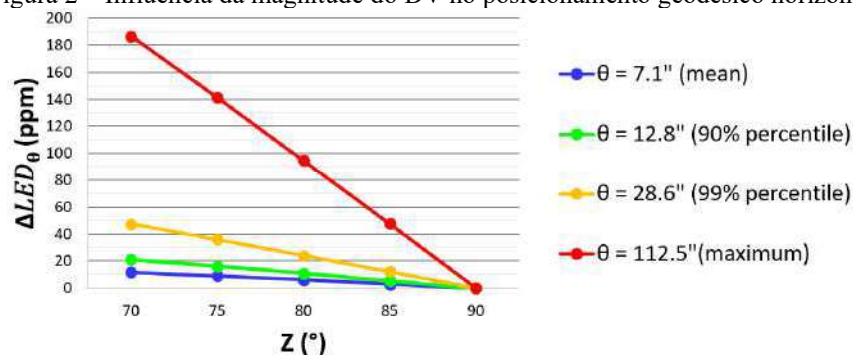
Figuras

Figura 1 – Mapa mundial da resultante dos desvios da vertical



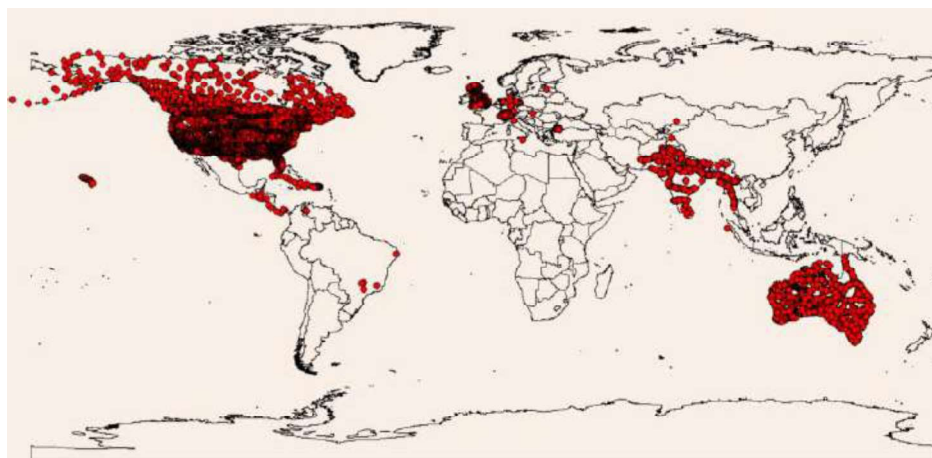
Fonte: extraído de [11]

Figura 2 – Influência da magnitude do DV no posicionamento geodésico horizontal



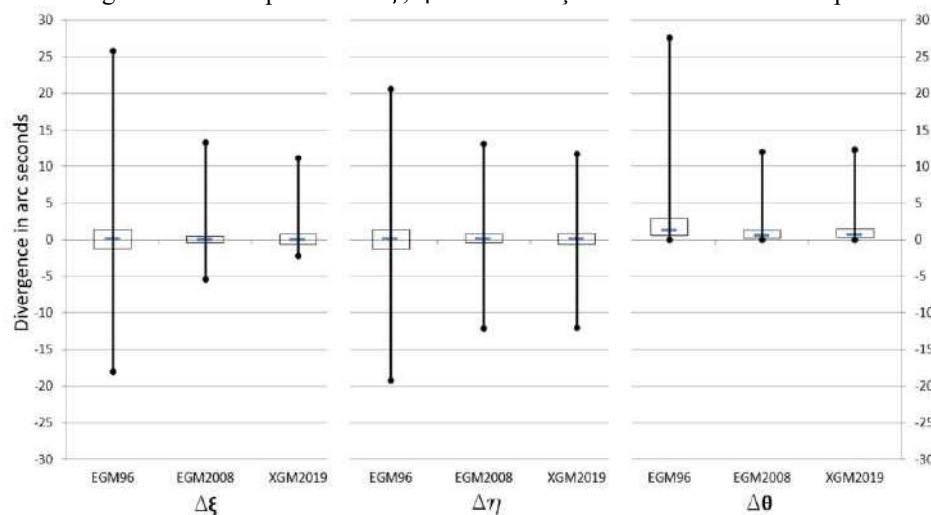
Fonte: extraído de [11]

Figura 3 – Distribuição dos pontos de referência no mapa



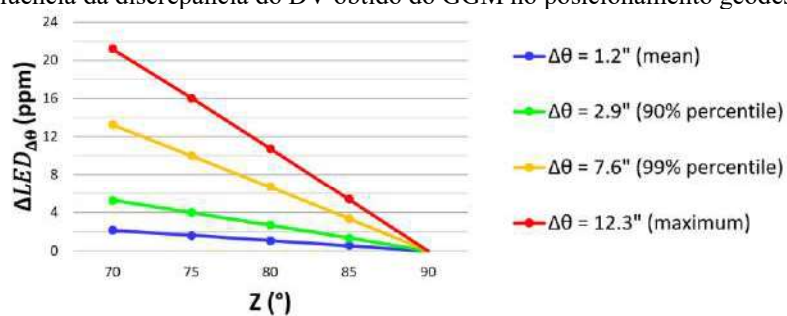
Fonte: extraído de [11]

Figura 4 – Discrepâncias do ξ , η e θ em relação ao observado em campo

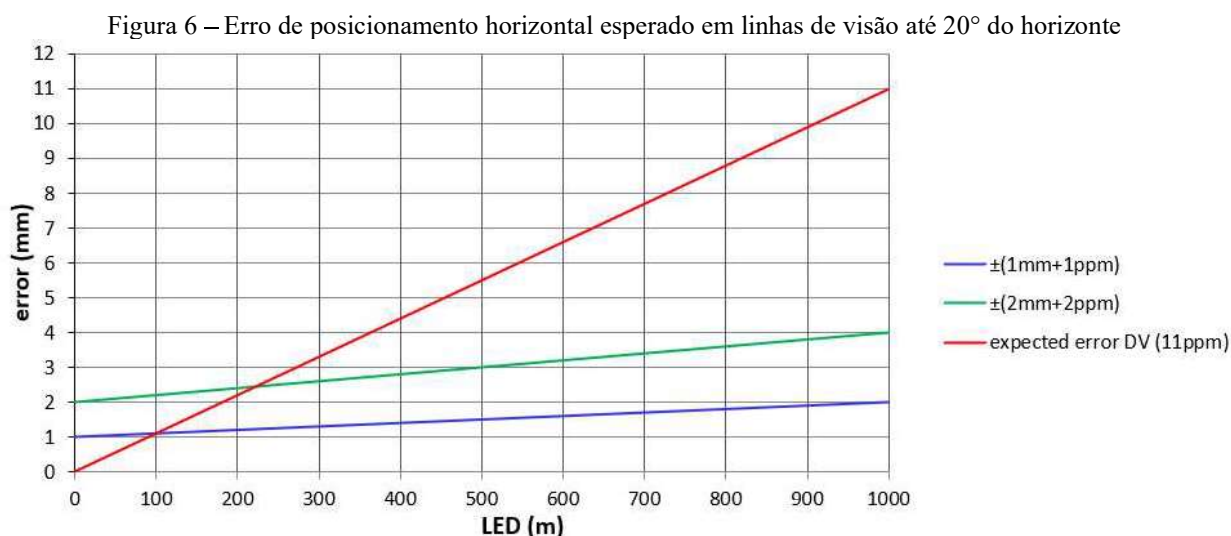


Fonte: extraído de [11]

Figura 5 – Influência da discrepância do DV obtido do GGM no posicionamento geodésico horizontal



Fonte: extraído de [11]



Fonte: extraído de [11]

Palavras-chaves: desvio da vertical; modelo global de geopotencial; posicionamento geodésico horizontal; levantamento com estação total.

Referências

- [1] DEAMBROGIO, L.; JULIEN, O. Characterization of Carrier Phase Measurement Quality in Urban Environments. In: EWGNSS 2013, 6th European Workshop On GNSS Signals And Signal Processing, 6, 2013, Munich. Conference papers. Ecole Nationale de L'aviation Civile, 2013. p. 1-8.
- [2] KLEIN, I.; GUZATTO, M. P.; HASENACK, M.; CABRAL, C. R.; LIMA, A. P. B.; FRITSCH, S.; REGINA JUNIOR, L. A. M.; MOMO, G. F. Rede de referência municipal para estações livres: uma proposta de baixo custo e grande abrangência. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 3, p. 519-532, 2017.
- [3] OSADA, E.; OWCZAREK-WESOŁOWSKA, M.; FICNER M.; KURPIŃSKI, G. TotalStation/GNSS/EGM integrated geocentric positioning method. **Survey Review**, v. 49, n. 354, p. 206-211, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1151969>.
- [4] LEMOINE, F. G. et al. **The Development of the Joint NASA GSFC and the National IMagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96**. Greenbelt, 1998.
- [5] 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**, v. 117, n. B4, p. 1–38, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>.
- [6] ICGEM INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS. **Calculation of Gravity Field Functionals**. Disponível em: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>. Acesso em 26 de maio de 2020.
- [7] INCE, E. S.; BARTHELMES, F.; REIBLAND, S.; ELGER, K.; FÖRSTE, C.; FLECHTNER, F.; SCHUH, H. ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. - **Earth System Science Data**, v. 11, p. 647-674, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.
- [8] GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. 695 p.
- [9] ZINGERLE, P.; PAIL, R.; GRUBER, T.; OIKONOMIDOU, X. The combined global gravity field model XGM2019e. **Journal of Geodesy**, v. 94, n. 7, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>.

[10] LEE, J.; KWON, J. Precision Evaluation of Recent Global Geopotential Models based on GNSS/Leveling Data on Unified Control Points. **Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography**, v. 38, n. 2, p. 153-163, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.2.153>.

[11] FRANÇA, R.; KLEIN, I.; VEIGA, L. A. K. Quality of the deflection of the vertical obtained from global geopotential models in horizontal geodetic positioning. *Applied Geomatics*. No prelo. 2022.