



Estudos Comparativos de Modelos Geoidais em Atendimento às Orientações da Agência Nacional de Águas para a Revisão das Curvas Cota x Área x Volume do Reservatório da UHE Serra da Mesa

Comparative Studies of Geoidal Models in Respect to the Guidelines of the National Agency of Waters for the Update of Curves Cota x Area x Volume of the Reservoir UHE Serra da Mesa

*Hélio Lopes Guerra Neto*¹
*Carlos Henrique da Rocha Oliveira*²

Recebido em abril de 2016.
Aprovado em junho de 2017.

RESUMO

Para o bom gerenciamento do potencial energético de uma usina hidrelétrica, faz-se necessário conhecer a curva Cota x Área x Volume (CAV) do reservatório. Por isso, a Agência Nacional de Águas (ANA) solicita que se façam atualizações periódicas dessas curvas pra fins de avaliação do processo de assoreamento, que pode causar impacto no volume d'água para a geração de energia. Este estudo visa analisar dentre os processos cartográficos aplicados no cálculo do volume do reservatório, a etapa de elaboração do Modelo Geoidal Local (MGL), tal qual solicitado pela ANA. Serão analisadas as ondulações geoidais calculadas a partir de diferentes modelos em relação às ondulações geoidais obtidas pela Rede de Vértices Geodésicos (RVG). Na primeira etapa das análises, verificar-se-á a adequação dos modelos geoidais e geopotenciais globais e regionais disponíveis com relação às orientações da ANA. Caso os modelos se mostrem inadequados, irá ser calculado um modelo geoidal local, confeccionado e analisado, em termos de acurácia, a partir de pontos nivelados geometricamente e rastreados por GNSS. A análise da acurácia dos modelos se dará em duas fases: verificação se há tendência ou viés e; qual a precisão. A ANA, com a possibilidade de utilização de um MGL, visa diminuir os custos e os prazos da coleta dos dados em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Geodésia. Modelo Geoidal. MAPGEO2010. MAPGEO2015. EGM2008. EIGEN-6C4.

¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Brasil. E-mail: helio.guerra@usp.br

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Cartográfica, Brasil. E-mail: carlos.henrique.oliveira.rocha@gmail.com

ABSTRACT

For a good management of the energetic potential of a power plant, it is necessary to know the graphic Cote x Area x Volume (CAV) of the reservoir. Because of that the National Water Agency (ANA) requests that periodic updates may be done of these curves for evaluation purposes of the silting process that can impact in the volume of water for power generation. This study aims to analyze, among the cartographic processes applied in the calculation of the reservoir volume, the service of execution of the local geoid model; this stage is requested by ANA. The undulations of different models against the undulations obtained by the Geodetic Network will be analyzed. The first step of the analysis will verify the adequacy of global and regional geoid models available with respect to ANA guidelines. If the models prove to be inadequate, it will be calculated a local geoid model and analyzed the accuracy of it, done from points geometrically leveled and tracked by GNSS. The analysis of the accuracy will be done by hypothesis test, first with bias analyze and then with the precision. ANA, with the possibility of using a local geoid model, aims to reduce the cost and time of collection of field data.

KEYWORDS: Geodesy. Geoid Model. MAPGEO2010. MAPGEO2015. EGM2008. EIGEN-6C4.

* * *

Introdução

O Brasil vem de maneira cíclica sendo assolado por crises hídricas, tornando imprescindível um melhor conhecimento dos volumes d'água armazenados nos reservatórios artificiais, pois os mesmos podem ter sofrido processo de assoreamento, podendo vir a interferir no potencial energético, com repercussão na tomada de decisões das empresas que os administram.

Dentro deste contexto, a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceram a Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03, de 10 de agosto de 2010, em que se preconiza, no artigo 8º, a revisão das curvas Cota x Área x Volume (CAVs). Estas curvas são obtidas normalmente mediante levantamento aerofotogramétrico realizado em fases anteriores ao enchimento dos reservatórios, sendo necessária a medição da área de cada curva de nível do reservatório e o posterior cálculo do volume a ser armazenado.

Por seu turno, o volume e a queda d'água irão balizar o cálculo do potencial energético do empreendimento. Como os reservatórios encontram-

se operacionais e, portanto, cheios, para a atualização das CAVs faz-se necessária a realização de levantamento batimétrico na área alagada.

Para esses levantamentos, a ANA publicou um documento intitulado Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume (ANA, 2013), sendo definidos alguns procedimentos de engenharia, por exemplo: estabelecimento de uma rede geodésica de apoio; nivelamento geométrico; levantamentos por Global Navigation Satellite System (GNSS). Para o apoio altimétrico, a ANA estabeleceu como possíveis procedimentos: o nivelamento geométrico; a utilização do MAPGEO2010 ou; o estabelecimento de um Modelo Geoidal Local (MGL) em conjunto com levantamentos GNSS.

Nesse contexto, a utilização de ondulações geoidais calculadas a partir de modelos visa à minimização dos trabalhos de campo e consequente diminuição dos custos e dos prazos envolvidos, tendo em vista que sem a utilização de modelos, a altitude de todos os pontos da rede geodésica teriam que ser obtidas via nivelamento geométrico.

O presente trabalho irá realizar a verificação da acurácia das ondulações geoidais calculadas a partir dos seguintes modelos: MAPGEO2010; MAPGEO2015; EGM2008 e; EIGEN-6C4. Será utilizada como área de estudo, a região do reservatório da UHE Serra da Mesa localizado a noroeste do Estado de Goiás.

As verificações terão como parâmetro o critério estabelecido pela ANA, qual seja, o erro máximo tolerável dos modelos serem de 20 (vinte) cm. Caso os modelos não o atendam, deverá ser elaborado um MGL, obedecendo ao mesmo critério.

Segundo Merchant (1982), a avaliação da qualidade posicional de produtos cartográficos pode ser realizada em duas fases: a primeira consiste em um teste estatístico com a distribuição t Student, para verificar a existência de tendência ou viés nos dados; a segunda é realizada com a distribuição Qui-quadrado para verificar a precisão das informações obtidas, ligada à existência de erros aleatórios. Serão esses os testes aplicados neste trabalho.

Cabe ressaltar que, neste trabalho, se está seguindo Gemael (1999) e Hoffmann-Wellenhof e Moritz (2006) e, pois, utilizando o termo ondulação geoidal como significando a separação Geoide-Elipsoide.

Enfim cabe ressaltar que este trabalho visa atender a uma exigência de um órgão regulamentador, sendo, portanto, um trabalho de engenharia.

2 Resolução Conjunta 03 ANA/ANEEL

A resolução conjunta ANEEL/ANA nº 03, de 10 de agosto de 2010, publicada em 20 de outubro de 2010, estabelece as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água relacionado ao aproveitamento hidrelétrico.

Dentre os serviços a serem realizados para o cumprimento da resolução está a revisão das curvas Cota x Área x Volume (CAVs).

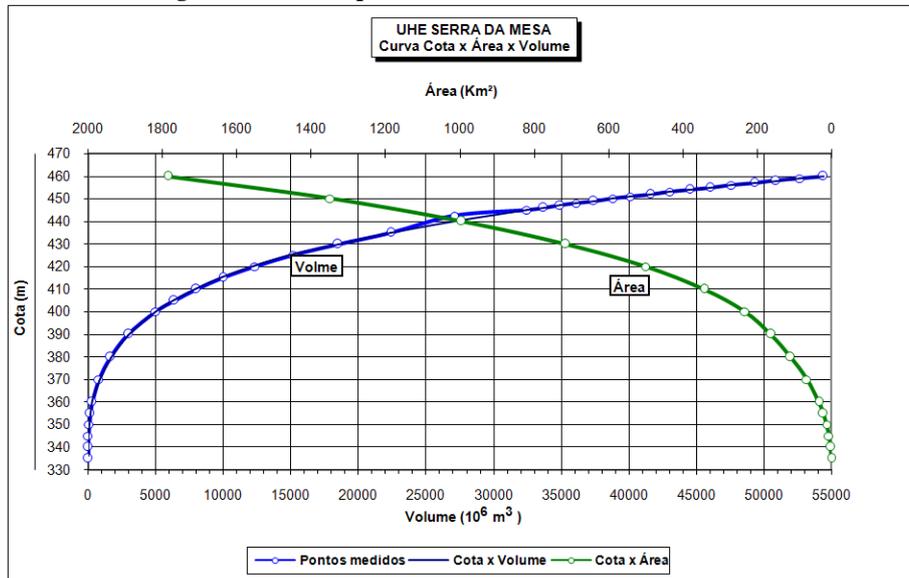
A revisão proposta pela ANA é necessária já que os reservatórios de acumulação podem sofrer processo de assoreamento com o passar dos anos alterando o volume passível de ser utilizado para geração de energia.

Este item está subdividido em dois: no primeiro, tratar-se-á do que é a CAV e; no segundo, como serão utilizados os modelos de interpolação das ondulações geoidais.

2.1 Curva cota x área x volume

O potencial elétrico de uma Usina Hidroelétrica (UHE) é calculado levando-se em consideração o reservatório de acumulação (volume) e a altura da queda d'água. Para este cálculo, utiliza-se um gráfico (Fig. 1) denominado Curva Cota x Área x Volume (CAV).

Figura 1 – Exemplo de Curva Cota x Área x Volume



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

Neste gráfico são apresentados os volumes e as áreas para cada curva de nível do reservatório. Os dados iniciais para confecção das CAVs são obtidos através da base cartográfica planialtimétrica confeccionada anteriormente ao enchimento do reservatório. Assim, para cada curva de nível a montante do futuro barramento é calculada a área e o volume, para gerar o gráfico CAV.

Entretanto, durante o período de funcionamento da usina, pode ter havido assoreamento do reservatório, diminuindo o volume a ser utilizado na geração de energia elétrica.

Tendo em vista este fato, as agências ANA e ANEEL recomendam a atualização periódica dos volumes efetivamente existentes; como atualmente o reservatório já está em operação, tal atualização somente pode ser realizada mediante levantamentos batimétricos, pois o terreno levantado anteriormente por aerofotogrametria está agora submerso.

Os levantamentos batimétricos deverão ter sua posição calculada com certo nível de acurácia, sendo recomendado o uso de uma técnica de posicionamento em tempo real, conhecida como Real Time Kinematic (RTK) para tal. O levantamento batimétrico é feito utilizando ecobatímetro

multifeixe ou monofeixe, este irá medir a distância da superfície até o fundo do reservatório em cada posição.

O RTK é uma técnica de posicionamento GNSS que fornece em tempo real as coordenadas planimétricas e altimétricas; contudo, sua altitude é a geométrica, sendo necessária, pois, a conversão para a ortométrica, utilizando-se de nivelamento geométrico ou de modelo matemático.

2.2 Modelo geoidal para apoio à batimetria

Devido às dimensões do reservatório da UHE Serra da Mesa, optou-se por utilizar modelos matemáticos para interpolação da ondulação geoidal, caso algum destes modelos tenham acurácia condizente com o preconizado pela ANA, ou confeccionar um MGL.

Para o apoio aos levantamentos batimétricos a serem realizados para a revisão das CAVs, é necessária a implantação de uma Rede de Vértices Geodésicos (RVGs), tais vértices deverão ter coordenadas tridimensionais, em que a planimetria será dada por coordenadas no sistema UTM e a altimetria por altitudes ortométricas, referidas ao marégrafo de Imbituba-SC.

Conforme mencionado, ANA (2013) permite que as altitudes sejam obtidas utilizando técnicas GNSS e correção via modelagem, desde que a acurácia das ondulações geoidais seja de no máximo 20 cm (vinte centímetros).

Bem, tomando-se o valor de 20 (vinte) cm como o erro máximo tolerável; supondo que os valores dos erros das ondulações geoidais estão normalmente distribuídos e; sabendo-se que o erro máximo tolerável é aquele que tem probabilidade de 1% de ser ultrapassado, correspondendo a 3 (três) vezes o valor do erro padrão (ABNT, 1994); pode-se saber que o erro padrão será de no máximo $(20/3)$ m, o que equivale a 6,67 (seis vírgula sessenta e sete) cm, aproximadamente.

Em suma, o limite para aceitação de determinado modelo ser o valor de no máximo 6,67 (seis vírgula sessenta e sete) cm.

Além disso, segundo ANA (2013), caso seja necessária a confecção de um MGL, de todos os pontos com potência de serem utilizados, pelo menos, 20% (vinte por cento) devem ser utilizados somente para a verificação do MGL.

3 Modelos geopotenciais e geoidais

Os Modelos Geopotenciais trazem informações variadas referentes ao campo de gravidade da Terra. Com o advento da era espacial, os modelos passaram por grande desenvolvimento. Esses modelos, desenvolvidos em séries de funções harmônicas esféricas, constituem-se na técnica mais utilizada de representação do campo da gravidade externa da Terra (Gemael, 1999). Com esses modelos, é possível relacionar altitudes geométricas, por rastreamento GNSS, e as ortométricas, através das ondulações geoidais obtidas dos coeficientes da expansão do potencial do campo da gravidade em funções harmônicas esféricas.

Os modelos do geopotencial, conjuntos de coeficientes do potencial anômalo desenvolvido em funções harmônicas esféricas, são determinados pela integração de diferentes dados obtidos por uma variedade de instrumentos.

A seguir serão explicados os dois modelos geopotenciais e os dois modelos geoidais testados neste trabalho.

3.1 EGM 2018

O EGM2008 (EarthGravityModel 2008) (PAVLIS et al., 2008) é um modelo geopotencial combinado da Terra. Seus principais dados foram obtidos através do satélite GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) e combinados com outros dados gravimétricos terrestres e oceânicos. O modelo é completo até grau e ordem 2159 (NGA, 2009) e possui resolução espacial de aproximadamente 9 km para todo o globo.

3.2 EIGEN-6C4

O EIGEN-6C4 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques) é o modelo geopotencial global combinado mais recente. Além de dados da missão GRACE, ele também inclui dados da missão GOCE (Gravity Field steady-state Ocean. Circulation Explorer) que foi organizada pela ESA (Europe Spacial Agency). O modelo é completo até o grau e ordem 2190. (FÖRSTE et al, 2014).

3.3 MAPGEO2010

Para a elaboração do MAPGEO2010, segundo De Matos et al. (2012), foram utilizadas mais de 920.000 estações gravimétricas; utilizou-se um Modelo Digital de Terreno (MDT) baseado no SRTM - Shuttle Radar Topography Mission, denominado SAM3s_v2, este foi usado para a obtenção da anomalia de gravidade completa de Bouguer, do efeito topográfico direto, do efeito topográfico indireto primário, do efeito topográfico indireto secundário, e do efeito atmosférico direto.

A malha de 5', resolução do modelo geoidal, das anomalias médias ar livre foi completada na região oceânica com as anomalias derivadas do modelo de altimetria por satélite do Danish National Space Center denominado DNSC08. Como referência, foi usado o modelo do geopotencial EGM2008 até o grau e a ordem 150, pois os coeficientes refletem somente as observações baseadas nos satélites.

3.4 MAPGEO2015

Segundo IBGE (2015), o modelo geoidal MAPGEO2015 foi calculado a partir de aproximadamente 950.000 estações gravimétricas terrestres na América do Sul, destas 450.000 no Brasil, valor este superior ao utilizado para o MAPGEO2010; o MDT permaneceu o SAM3s_v2; o modelo geopotencial

global de referência para os longos comprimentos de onda do campo da gravidade foi o EIGEN-6C4, até o grau e ordem 200.

É interessante considerar que as instruções da ANA são de 2013, portanto anteriores ao MAPGEO2015, deste modo, caso tal modelo atenda ao especificado pela ANA, poderá ser dada sugestão àquela Agência de adotar o MAPGEO2015.

3.5 Modelo Geoidal Local (MGL)

Especificamente, para atendimento à resolução conjunta, quando o modelo geoidal adotado para o Brasil não atender aos requisitos de acurácia, um MGL deve ser calculado. O MGL é calculado a partir de: levantamentos GNSS, que fornecem as coordenadas tridimensionais de uma estação, podendo ser transformadas em coordenadas projetivas e em altitude geométrica; nivelamento geométrico que fornece a altitude ortométrica.

Em linhas gerais, o MGL é obtido pelo rastreamento de sinais provenientes de satélites do sistema GNSS em marcos que possuam altitude conhecida; em seguida, interpola-se uma superfície que represente a variação da ondulação geoidal na região; a partir desta superfície, interpola-se a ondulação geoidal de um ponto; caso o ponto possua ondulação geoidal conhecida, pode ser realizada a análise do MGL para a região de interpolação.

É mister ressaltar que o MGL assim obtido somente possui validade para a região de abrangência dos pontos medidos.

Mais detalhes, para obtenção e análise da acurácia de um MGL para a presente área de estudo, serão fornecidos no item 6.3.

4 Análise da acurácia

Existem diversos critérios que podem ser utilizados para a análise estatística de dados. Inicialmente é importante explicar que segundo Monico et al. (2009) “considerando-se a definição original de Gauss, não há dúvida de

que o termo acurácia envolve tanto erros sistemáticos como aleatórios, enquanto precisão está unicamente vinculada com erros aleatórios”.

Assim, a análise da acurácia pode ser dividida em análise de tendência e análise de precisão. Para o presente estudo, será utilizada a diferença entre as ondulações extraídas de cada modelo e as ondulações consideradas de referência. A discrepância observada é dada pela Equação 2:

$$\Delta x_i = X_i - X_i^r \quad (1)$$

onde Δx_i é a i-ésima discrepância; X_i é a i-ésima ondulação calculada via modelo geoidal (global, regional ou local); o sobrescrito r significa referência; e X_i^r é, portanto, a i-ésima ondulação de referência.

As ondulações de referência são as oriundas de pontos em que houve nivelamento geométrico e rastreamento GNSS.

Assim, este trabalho propõe empregar, na análise da acurácia, metodologia semelhante àquela empregada nos testes de acurácia para Cartas, realizando análise estatística composta dos testes de hipótese t de Student e Qui-quadrado (GALO e CAMARGO, 1994). Tais testes serão mostrados neste item.

4.1 Análise da tendência

A análise de tendência é utilizada para a identificação de possível viés nos dados. É importante verificar a tendência, pois esta pode ser removida do modelo, tornando-o não-enviesado.

Assim quer se testar a média das diferenças (Equação 1), sendo utilizado um Teste de Hipóteses, a saber:

$$H_0 : \bar{\Delta x} = 0 \quad (2)$$

$$H_1 : \bar{\Delta x} \neq 0 \quad (3)$$

em que H_0 é a hipótese básica (Equação 2), que será testada; H_1 é a hipótese alternativa (Equação 3), verdadeira caso a hipótese básica seja rejeitada; e $\bar{\Delta x}$ é a média aritmética das discrepâncias.

A hipótese básica informa, que para tal nível de significância não se pode afirmar tendência. A hipótese alternativa informa que para o mesmo nível de significância, não há como descartar tendência nos dados.

A média aritmética e o desvio padrão das diferenças são calculados, respectivamente, pela Equação 4 e 5, a seguir:

$$\bar{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (4)$$

$$s_{\Delta x} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \bar{\Delta x})^2} \quad (5)$$

Onde: $\bar{\Delta x}$ é a média aritmética das diferenças; $s_{\Delta x}$ é o desvio padrão amostral; e n em ambas as equações é o tamanho da amostra.

Como não se conhece o desvio padrão populacional é indicado realizar o teste t de Student.

O teste t de Student permite analisar se a média aritmética das diferenças é igual a zero e se há ou não tendência na amostra.

O valor de t amostral é calculado pela Equação 6:

$$t_{amostral} = \frac{\bar{\Delta x}}{s_{\Delta x}} \sqrt{n} \quad (6)$$

e o intervalo de confiança pela Equação 7:

$$|t_{amostral}| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (7)$$

onde α é o nível de significância do teste de hipótese; n é o tamanho da amostra.

Caso a inequação 7 não se mostre verdadeira e, portanto, o amostral esteja fora do intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula e os dados não podem ser considerados sem tendência; caso contrário, aceita-se a hipótese nula e os dados podem ser considerados livres de tendências.

Quando identificada, a tendência pode ser extirpada subtraindo das diferenças calculadas a média aritmética amostral (CAMARGO et al, 2007) e se a precisão estiver dentro do intervalo preconizado, o modelo matemático pode ser utilizado.

4.2 Análise da precisão

A precisão está ligada aos efeitos aleatórios e será verificada mediante teste do Qui-quadrado que indica o grau de dispersão dos erros (GALO e CAMARGO, 1994). Para isso, o teste define as seguintes hipóteses:

$$H_0: s_{\Delta x}^2 = \sigma_{\Delta x}^2 \quad (8)$$

$$H_1: s_{\Delta x}^2 > \sigma_{\Delta x}^2 \quad (9)$$

Para este teste de hipótese, utiliza-se a estatística Qui-quadrado, dada pela Equação 10, calculada pelos dados amostrais:

$$X^2 = (n - 1) \frac{s^2 \Delta x}{\sigma^2 x^2} \quad (10)$$

e o intervalo de aceitação da hipótese pela Inequação 11:

$$X^2 \leq X_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (11)$$

Nas Equações 10 e 11, s é o desvio padrão amostral; σ é o desvio padrão populacional ou erro padrão; n é o tamanho da amostra; α é o nível de significância

Caso o valor não se encontre dentro do intervalo estabelecido, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, o modelo não atende à precisão preconizada pela ANA.

Uma vez que não se conhece o valor do desvio padrão da população, seu valor será aquele que satisfizer o teste do Qui-quadrado, para cada modelo geoidal.

Conforme mencionado no item 2.2, será estabelecido que o erro padrão dos modelos geoidais deve ser de no máximo 6,67 cm. Assim, o valor de 6,67 cm é considerado como sendo o valor máximo para o desvio padrão da população.

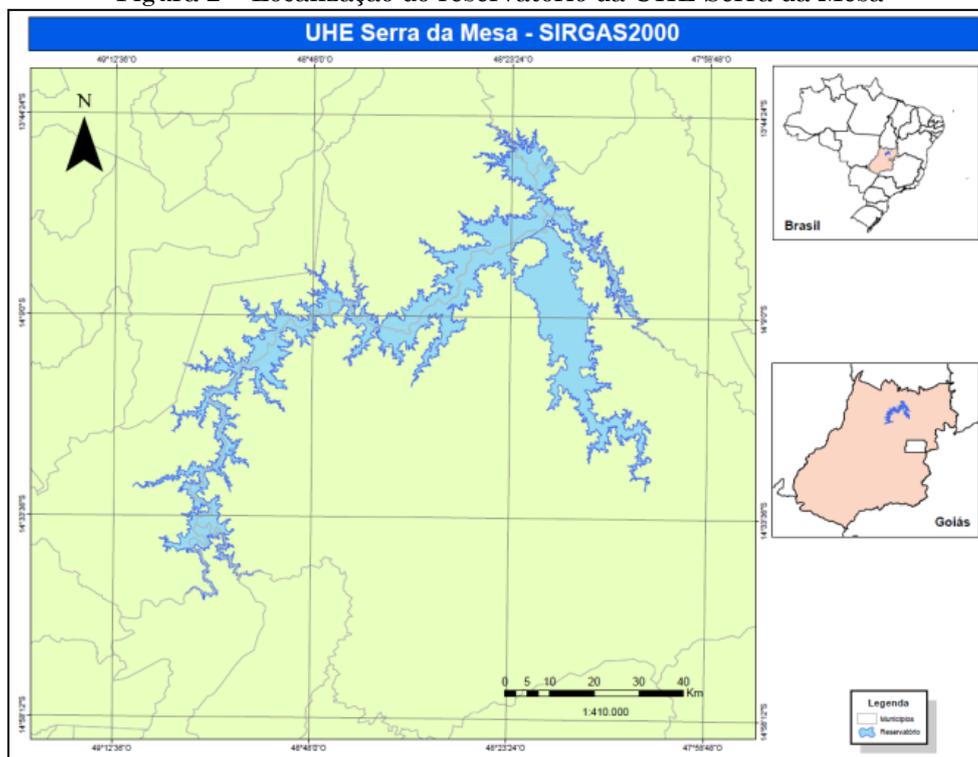
Tanto para o teste de tendência, como o teste de precisão serão utilizados um nível de significância de 5%.

5 Área de estudo

Para o presente trabalho, escolheu-se como área de estudo o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Serra da Mesa. A escolha deveu-se pela disponibilidade e confiabilidade dos dados disponíveis, pois todos os processos realizados estão de acordo com as recomendações da ANA. Além disso, estão descritos em relatórios, sejam do IBGE, sejam de FURNAS, sejam da empresa contratada.

O reservatório da UHE Serra da Mesa - Fig. 2 - começou a operar em 1996, estando localizado na bacia do alto Tocantins, a noroeste do estado de Goiás, possui uma área de aproximadamente 1.800 km², sendo quase 5 (cinco) vezes maior que a Baía de Guanabara, no estado do Rio de Janeiro, e um volume de 54 bilhões de metros cúbicos, sendo o maior do Brasil em volume de armazenamento. O nível d'água operacional de montante é de 460,5 m.

Figura 2 – Localização do reservatório da UHE Serra da Mesa



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

6 Resultados

Neste item serão apresentados os resultados alcançados.

6.1 Ondulações geoidais de referência

Para a análise proposta neste trabalho, são necessários pontos em que a ondulação geoidal seja conhecida. Sabe-se que a ondulação geoidal pode ser calculada pela Equação 12:

$$N = h - H \quad (12)$$

onde: N é ondulação geoidal; h é a altitude elipsoidal; e H é a altitude ortométrica.

Desse modo, para o cálculo da ondulação geoidal de referência é preciso que sejam conhecidas a altitude geométrica e a altitude ortométrica de um

ponto; esta é obtida via nivelamento geométrico e aquela, por rastreamento GNSS.

Para a presente análise, foram, então, rastreados e nivelados (e contranivelados) geometricamente 81 (oitenta e um) pontos, listados na Tabela 1, fornecendo, assim, as ondulações geoidais de referência. Os pontos utilizados têm diversas origens: marcos SAT e RRNN do IBGE; marcos de FURNAS Centrais Elétricas SA, sócia do empreendimento hidrelétrico; marcos de empresa contratada por FURNAS. Os valores altimétricos estão compatíveis com o reajustamento altimétrico de 2011 do IBGE. Os levantamentos foram realizados para atender demandas diversas, contudo apresentam qualidades compatíveis.

Tabela 1– Ondulações Geoidais de Referência.

Ponto	Ond. (m)	Ponto	Ond. (m)	Ponto	Ond. (m)
2269F	-15,268	505F	-12,087	600R	-13,030
2269G	-15,289	506H	-13,309	600V	-13,123
2269N	-15,333	506M	-13,637	601B	-13,245
2270E	-15,177	506P	-13,649	601F	-12,865
3246E	-15,282	506Z	-13,721	601K	-12,717
3246F	-15,227	507D	-13,944	601M	-12,449
3246H	-15,215	507H	-14,108	602C	-13,222
3246T	-14,891	508C	-14,861	602D	-13,337
3246V	-14,766	508G	-15,141	602E	-13,480
3247H	-14,195	508N	-15,344	602G	-13,433
3247R	-13,978	508Q	-15,377	602I	-12,320
3254S	-14,338	510C	-14,432	602L	-12,131
92602	-15,246	510H	-14,338	602M	-12,276
92603	-15,274	510M	-14,305	602O	-12,293
92620	-12,253	510N	-14,292	602P	-12,230
92622	-14,614	510Q	-14,277	SAT1	-13,517

Tabela 1– Ondulações Geoidais de Referência.

92666	-14,082	512H	-13,812	SAT2	-13,559
1000B	-13,827	518C	-12,660	SAT3	-13,323
1000C	-15,347	518H	-12,994	ST22	-15,155
501F	-11,974	518N	-13,337	ST28	-12,808
501I	-12,180	518R	-13,567	ST31	-12,894
501M	-12,406	600G	-13,719	ST33	-12,864
501Q	-12,363	600H	-13,741	ST37	-12,096
502H	-11,913	600I	-13,595	ST46	-12,065
503Q	-12,843	600J	-13,521	RN05	-13,625
505D	-12,056	600L	-13,655	RN11	-13,521
505E	-12,087	600O	-13,215	RN88	-14,695

Fonte: Elaborado pelos autores.

6.2 Análise dos modelos geoidais globais e regional

Como procedimento para a análise proposta, seguimos os seguintes passos:

- a) Para cada modelo e cada ponto, extrai-se a ondulação geoidal;
- b) Subtrai-se cada valor da ondulação geoidal obtida via modelos geoidais dos valores das ondulações geoidais de referência. O resultado é a amostra a ser utilizada na análise;
- c) Calculam-se os parâmetros estatísticos da amostra: média aritmética simples; desvio padrão; e o erro médio quadrático.

Ver Tabela 2;

Tabela 2– Parâmetros estatísticos por modelo.

Modelo	Média (m)	Desvio padrão (m)	EMQ (m)
MAPGEO2010	0,435	0,174	0,472
MAPGEO2015	0,148	0,155	0,215
EGM2008	0,366	0,192	0,415
EIGEN-6C4	0,604	0,142	0,625

Fonte: Elaborado pelos autores.

- d) Em seguida é realizado o teste de hipótese t de Student para análise de tendência, verificando os valores de amostral e o valor de t, calculado ao nível de significância de 5 (cinco)%.

Tabela 3– Análise de tendência.

Modelo	t amostral	t_{(78)0,025}
MAPGEO2010	22,17	1,99
MAPGEO2015	8,47	
EGM2008	16,90	
EIGEN-6C4	37,64	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Todos os valores do amostral (segunda coluna da Tabela 3) ficaram acima do valor da estatística t, para um nível de significância de 5% (terceira coluna da Tabela 3), portanto as diferenças entre os modelos apresentam tendência.

- e) Para eliminar a tendência apresentada, subtrai-se a média aritmética de todas as diferenças;

- f) Em seguida, procede-se à Análise da Precisão, realizando o teste do Qui-quadrado. Deseja-se calcular o erro padrão da população, sendo este erro o valor que satisfizer o teste do Qui-quadrado. O resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4– Análise da precisão.

Modelo	Erro padrão (cm)	χ² amostral	χ² (78),5%
MAPGEO2010	15,31	102	102
MAPGEO2015	13,60	102	
EGM2008	16,83	102	
EIGEN-6C4	12,49	102	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pelas Tabelas 2 e 4, é mister notar a melhora conseguida com o modelo MAPGEO2015 em relação ao MAPGEO2010, entretanto, o modelo EIGEN-6C4 mostrou-se o de menor erro padrão para a área de estudo.

Verifica-se que os erros padrões de todos os modelos matemáticos testados ficaram acima do valor tolerável de 6,67 (seis vírgula sessenta e sete) cm; assim, conclui-se, ao nível de significância de 5 (cinco) %, pela não

adequação, para o caso do reservatório da UHE Serra da Mesa, dos modelos analisados aos critérios da ANA, quando aplicados de forma absoluta, pois não foram testados em sua forma relativa. Portanto, faz-se necessária a confecção de um Modelo Geoidal Local.

6.3 Modelo geoidal local

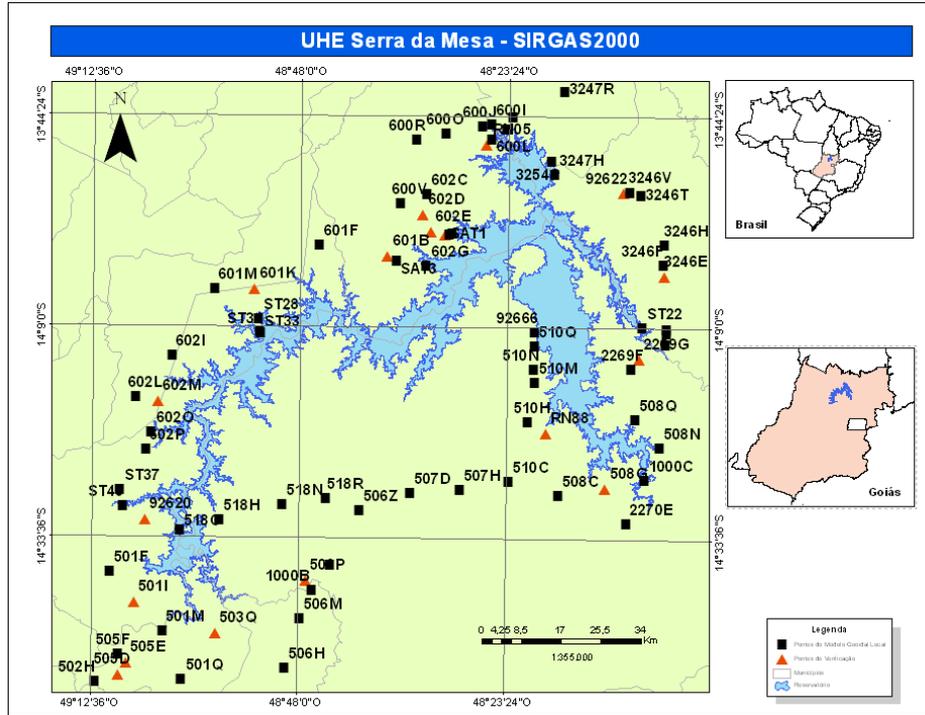
Como visto anteriormente, os modelos não atingiram a acurácia recomendada pela ANA e usada como referência neste trabalho.

Neste caso, faz-se necessária a elaboração do MGL, utilizando as ondulações dos pontos de referência. A metodologia para a confecção do MGL e os resultados alcançados estão nos próximos itens.

6.3.1 Definição dos pontos

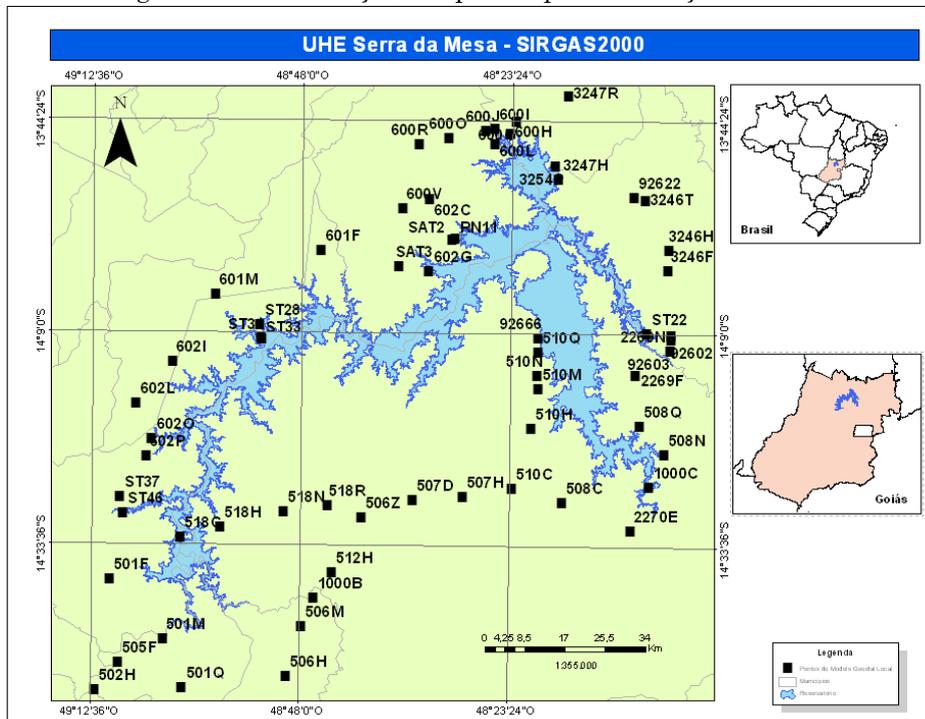
Esta atividade consiste na escolha dos pontos a serem utilizados para a confecção e verificação do MGL. Dos 81 (oitenta e um) pontos disponíveis (Fig. 3), foram utilizados 63 (sessenta e três) para a confecção do MGL (Fig. 4), os restantes 18 (dezoito) foram utilizados para a verificação do modelo (Fig. 5), equivalendo a 20% do total de pontos, conforme recomendação da ANA. Nos diversos mapas, os quadrados representam os pontos utilizados para a confecção do MGL e os triângulos, os pontos de verificação.

Figura 3 – Distribuição total dos pontos



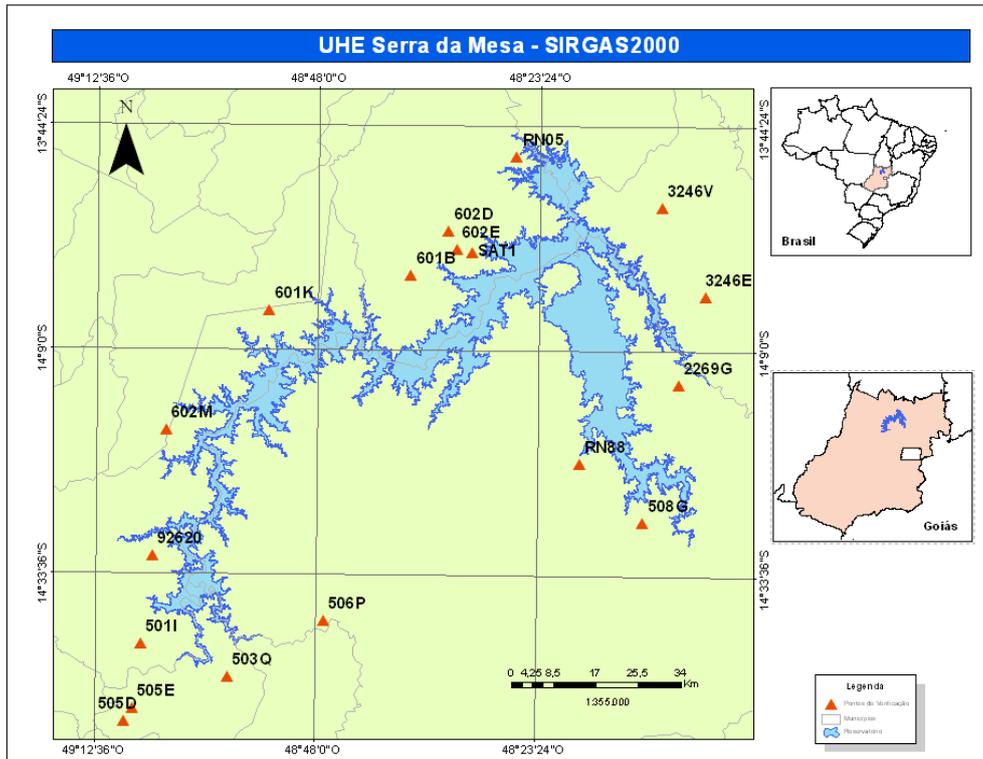
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Distribuição dos pontos para confecção do MGL



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Pontos de verificação do MGL.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a escolha dos pontos geradores do MGL, procurou-se a melhor distribuição geográfica em torno da área do reservatório, a fim de permitir que o modelo gerado seja o mais homogêneo, confiável e abrangente possível.

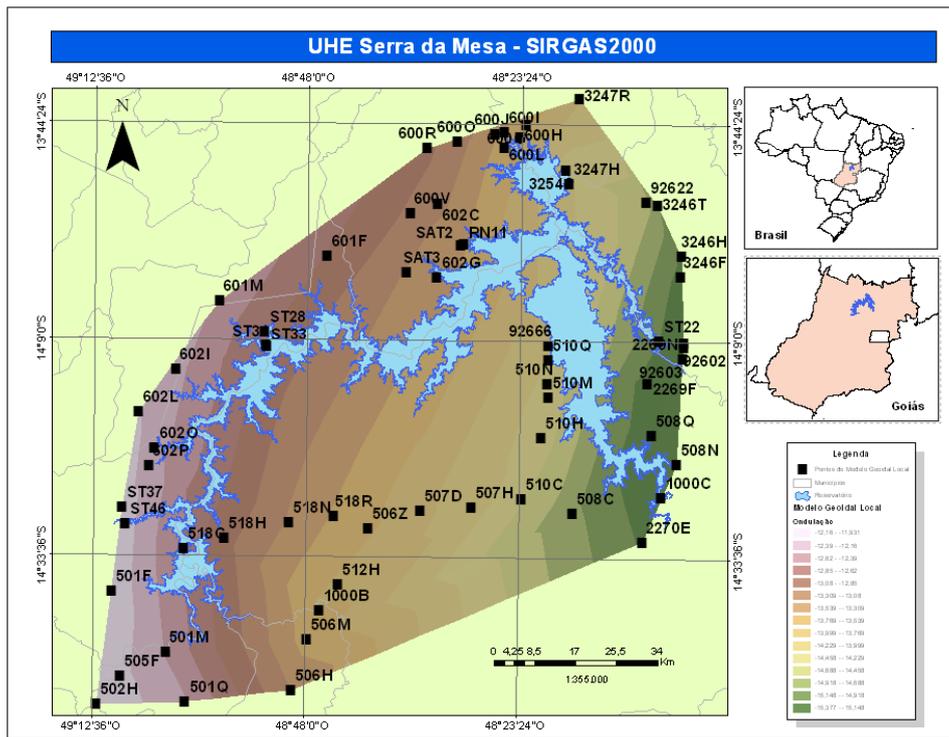
O mesmo critério foi adotado para os pontos de verificação, visando melhor distribuição possível, para que todas as regiões do MGL fossem contempladas.

6.3.2 Elaboração do MGL

Para a confecção do MGL, é necessário a partir das ondulações geoidais conhecidas dos 63 (sessenta e três) pontos selecionados (Fig. 4) interpolar uma superfície que represente a variação espacial de tal grandeza na região de estudo. O método de interpolação utilizado foi a Rede Irregular de Triangulação (TIN – Triangulated Irregular Network), em que cada um dos 63 (sessenta e três) pontos é um vértice de um triângulo e a ondulação geoidal

é calculada por interpolação linear. O método foi escolhido porque foi o de melhor resultado. Para o cálculo da triangulação foi utilizado o software Arcgis, com a função Criar TIN, localizada em ArcToolbox>Gerenciamento de Dados>TIN>Criar TIN.

Figura 6 – Mapa de Ondulação Geoidal Local

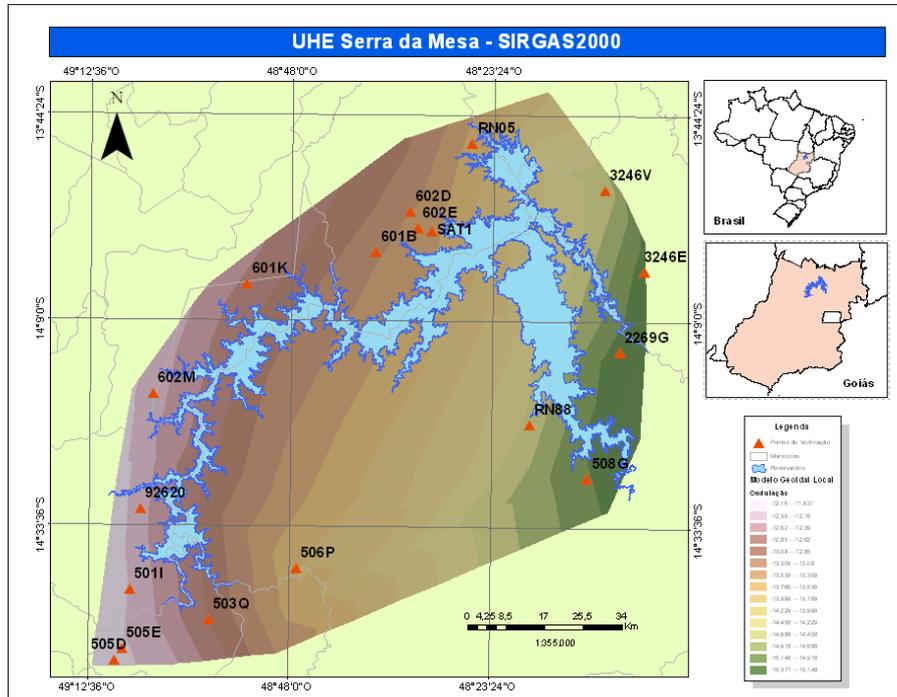


Fonte: Elaborado pelos autores.

6.3.3 Verificação do MGL

De posse do MGL calculado, são extraídas as ondulações geoidais para os 18 (dezoito) pontos de verificação dentro da região interpolada (Fig. 7) e estas são comparadas com os valores de referência.

Figura 7 – Mapa de Ondulação e Pontos de verificação



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para realizar essa extração, utilizou-se a ferramenta extract value, na seção Spatial Analyst do software ArcGIS. Depois, no próprio programa, calculou-se a diferença entre a ondulação de referência e a ondulação extraída.

Como pode ser observado na Tabela 5, a diferença entre a ondulação interpolada e a ondulação de referência ficou abaixo do valor limite de 20 (vinte) cm para todos os pontos. Este resultado é um indicador da probabilidade de o MGL ser compatível com as especificações fornecidas pela ANA, em suas orientações.

Tabela 5– Diferença entre a ondulação geoidal calculada pelo MGL e a referência.

Ponto	Ond. Referência (m)	Ond. Interpolada (m)	Dif. (m)
2269G	-15,2886	-15,252	0,037
3246E	-15,2824	-15,250	0,032
3246V	-14,7659	-14,577	0,189
92620	-12,2531	-12,299	-0,046
ST01	-13,5169	-13,536	-0,019
505E	-12,0868	-12,115	-0,028
501I	-12,1798	-12,178	0,002
503Q	-12,8434	-12,851	-0,007
505D	-12,0563	-12,059	-0,003
506P	-13,6490	-13,755	-0,106
508G	-15,141	-15,125	0,016
601B	-13,2455	-13,261	-0,015
601K	-12,7170	-12,673	0,044
602E	-13,4804	-13,433	0,048
602D	-13,3374	-13,310	0,027
602M	-12,2765	-12,292	-0,015
RN05	-13,6249	-13,622	0,003
RN88	-14,6950	-14,544	0,151

Fonte: Elaborado pelos autores.

A verificação propriamente do MGL consiste em realizar as mesmas análises descritas anteriormente e realizadas para os modelos globais e regional, quais sejam, a análise de tendência e a análise de precisão. Os valores das estatísticas a serem utilizadas nas análises constam na Tabela 6.

Tabela 6– Análise estatística dos pontos.

Média	0,0172
Desvio Padrão	0,0668
EMQ (m)	0,0735
t amostral	1,0903
t 95%	2,1098
Erro padrão (m)	0,0524
Qui-quadrado teórico	27,5

Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme pode ser visto pela Tabela 6, os dados não possuem tendência já que o t amostral é menor que o t 95%.

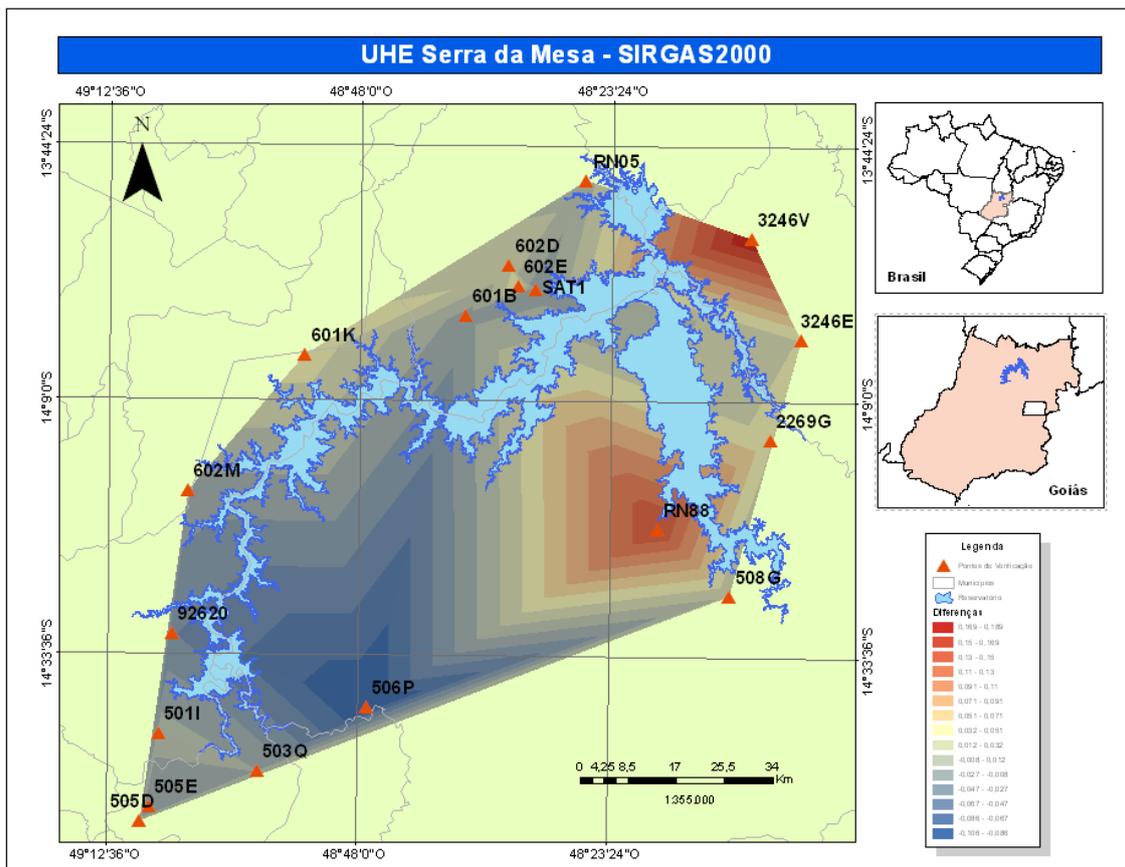
No teste da precisão, utilizando a estatística do Qui-quadrado, o menor valor do erro padrão compatível com o Qui-quadrado teórico é de 5,24 (cinco vírgula vinte e quatro) cm; ora, como o recomendado pela ANA é de 6,67 (seis vírgula sete) cm.

vírgula sessenta e sete) cm; logo, o MGL elaborado atende aos padrões recomendados pela ANA.

Ambos os testes foram realizados ao nível de 5% de significância, portanto, o MGL elaborado atende ao preconizado pela ANA.

Para ilustrar a variação das diferenças na região ora estudada, foi elaborado mapa contendo a variação espacial das diferenças. Para a interpolação da variação contínua foram utilizadas as mesmas ferramentas para o cálculo do MGL. A variação espacial das diferenças está mostrada na Fig. 8.

Figura 8 – Mapa das diferenças entre as ondulações interpoladas e as ondulações de referência.



Fonte: Elaborado pelos autores.

7 Conclusões

Este trabalho propôs-se a analisar a acurácia dos diversos modelos geopotenciais e geoidais disponíveis incluindo o mais recente modelo para o Brasil, MAPGEO 2015, tendo como critério o erro máximo tolerável de 20 (vinte) cm. Ressalta-se que os valores fornecidos pelos modelos foram comparados em forma absoluta, não foram realizadas análises de valores relativos.

Para isso, foi utilizada a Rede de Vértices Geodésicos no entorno do reservatório da UHE Serra da Mesa, sendo compostas de marcos SAT e RRNN, de diversas origens: IBGE; FURNAS; e empresa contratada por FURNAS.

O trabalho propôs-se a realizar a verificação da acurácia dos Modelos Geopotenciais e dos Modelos Geoidais em duas etapas, a saber, análise de tendência e de precisão. Esta realizada por um teste do Qui-quadrado e aquela por um teste t de Student.

Verificou-se que nenhum dos Modelos Geopotenciais e Geoidais de abrangência mundial ou nacional alcançou a acurácia recomendada pela ANA. Ressalta-se, entretanto, a qualidade superior, para esta região, do modelo EIGEN-6C4, sendo ele o que mais se aproximou das normas estabelecidas pela ANA. É mister salientar o ganho de qualidade conseguido pelo MAPGEO2015, para o cálculo da ondulação geoidal na região estudada.

Assim, sem que nenhum dos modelos alcançasse a acurácia preconizada, fez-se necessária a elaboração de um MGL.

Para a elaboração do MGL, foi utilizada parte dos pontos disponíveis, ficando outra parte como reserva para a verificação do MGL. Os mesmos testes estatísticos utilizados anteriormente foram realizados para a verificação da acurácia do MGL.

Os resultados destes testes comprovaram, ao nível de significância de 5%, a consistência do MGL com as especificações da ANA. Assim, a região do

reservatório possui um Mapa de Ondulação de confiança que pode ser utilizado para minimizar os trabalhos de campo para a atualização das CAVs.

Por fim, há algumas recomendações que os autores gostariam de externalizar:

- a) Análise mais aprofundada dos diversos métodos de interpolação da ondulação geoidal, comparando-os a fim de buscar um produto que se adeque ainda mais à variação da ondulação geoidal na região;
- b) Análise de outros modelos regionais que forem gerados no futuro;
- c) Visando aumentar o rigor científico, seria interessante proceder a um levantamento gravimétrico, o que traria caráter físico às altitudes que neste trabalho têm caráter puramente geométrico.

Agradecimentos

Ao meu ex Professor, Chefe e Orientador, Carlos Henrique que também participa e colabora com esse trabalho, à Furnas Centrais Elétricas (DGSE) pela oportunidade, aprendizado e uso desse material e ao Professor Alan Salomão no incentivo de redigir e enviar esse trabalho.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13133/1994. Execução de Levantamento Topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. P. 35.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília, 2013. p. 39.
- CAMARGO, F. F.; OLIVEIRA, C. G.; FLORENZANO, T. G. ; ALMEIDA, C. M. Avaliação da acurácia posicional da base cartográfica do município de São José dos Campos (SP) por análises de tendência e precisão. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia - I Congresso Brasileiro de Geoprocessamento**. Anais. Rio de Janeiro, 2007
- DE MATOS, A.C.O.C.; BLITZKO, 2007.W, D.; GUIMARÃES, G.N.; LOBIANCO, M.C.B.; COSTA, S.M.A. Validação do MAPGEO2010 e comparação com modelos do geopotencial recentes. In: **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 18, n. 1, 2012.
- FORSTE et al, “The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse”. In: **5th GOCE User Workshop**, Paris. 2014. pp 25–28.
- GALO, M. e CAMARGO, P.O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In **1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC**, Florianópolis, 1994. Anais. 1994. pp. 41-48.
- GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. 10ª ed. Curitiba: Editora UFPR, 2012. 580p.
- HOFFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. Springer Wien New York, New York, 2006. 403p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Modelo de Ondulação Geoidal. Site http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm. acessado em 29 de mar de 2016.
- MERCHANT, D. C., Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In **Proceedings of the Technical Congress on Surveying and Mapping**, 1982. pp 222-231.

- MONICO, J.F.G; PÓZ, A.P.D.; GALO, M.; SANTOS, M.C.D; OLIVEIRA, L.C.
Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.15, n.3, 2009. pp.469-483
- PAVLIS, N.K., HOLMES, S.A., KENYON, S.C., FACTOR, J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. In: 2008 **General Assembly of the European Geoscience Union**. Vienna, Austria, April, 2008.