

Comparação dos programas TC2DFTPL e TCFOUR no cálculo da correção de terreno para o Estado do Rio Grande do Sul

Comparison of TC2DFTPL and TCFOUR programs in calculating terrain correction to Rio Grande do Sul State

Gabriela Pasetto Falavigna¹
Sérgio Florêncio de Souza¹

¹ Departamento de Geodésia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Campus do Vale. Cep 91501-970. Porto Alegre, RS, Brasil.
gabi_falavigna@hotmail.com, sergio.florencio@ufrgs.br

RESUMO – A correção de terreno é uma das reduções gravimétricas aplicadas ao valor da aceleração da gravidade. O objetivo desse trabalho consistiu na comparação do desempenho dos programas TC2DFTPL e TCFOUR para verificar se há diferenças significativas entre eles no cálculo da correção de terreno para o Estado do Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos para os programas TC2DFTPL e TCFOUR foram similares. No entanto, o programa TCFOUR apresentou efeito de borda, ao contrário do programa TC2DFTPL. Notou-se uma diferença entre os resultados estatísticos para os valores máximos e mínimos obtidos para a correção de terreno, calculada por ambos os programas utilizando os MDTs do SRTM e do ASTER nas resoluções de 5 km, 2 km e 1 km. Concluiu-se que essa diferença se deva à necessidade de dividir a área de estudo para as maiores resoluções e também às diferenças altimétricas entre os dois MDTs; mais evidentes na região das maiores altitudes, como é o caso da região da Serra Geral.

Palavras-chave: TC2DFTPL, TCFOUR, Modelos digitais de terreno, Correção de terreno, Reduções gravimétricas.

ABSTRACT – The terrain correction is one of gravimetric reductions applied to gravitational acceleration value. The purpose of this study was compare the performance of TC2DFTPL and TCFOUR programs to check significant differences between these programs in calculating terrain correction for Rio Grande do Sul State. The results obtained for the TC2DFTPL and TCFOUR programs were similar. However, the TCFOUR program presents border effect, unlike TC2DFTPL program. It was noted a mismatch between the statistics results to maximum and minimum values obtained for terrain correction, calculated by both programs using the SRTM and ASTER DTMs with resolutions of 5 km, 2 km and 1 km. It was conclude that this difference is due to the need to partition the study area for higher resolutions and also the altimetric differences between two DTMs; more evident in the region of higher altitudes, such as the Serra Geral region.

Keywords: TC2DFTPL, TCFOUR, Digital terrain models, Terrain correction, Gravimetric reductions.

1. INTRODUÇÃO

A determinação do geoide através de dados gravimétricos envolve a solução do Problema do Valor do Contorno da Geodésia (PVCG), o qual pressupõe duas condições (GEMAEL, 2002):

- i. as medidas gravimétricas devem ser feitas sobre a superfície geoidal; e
- ii. não devem existir massas externas ao geoide.

O efeito gravitacional das massas topográficas localizadas acima do geoide deve ser considerado em várias aplicações da Geodésia Física, como, por exemplo, no cálculo das anomalias da gravidade (anomalia ar livre, de Bouguer, isostática) e das ondulações do geoide (MATOS, 2005).

A primeira condição do PVCG é satisfeita através da correção ar livre, que reduz o valor observado da gravidade ao geoide; e a segunda, pode ser atendida através do método de condensação de Helmert (MATOS,

2005), por meio do qual as massas topográficas são removidas e subsequentemente recolocadas no interior do geoide, considerando as massas externas com uma densidade específica.

A anomalia ar livre é obtida através da aplicação da correção ar livre, que considera a variação da gravidade entre a superfície física e a superfície do geoide, utilizando a altitude do ponto e desconsiderando a massa entre essas superfícies. A anomalia de Bouguer é obtida a partir da correção Bouguer, que remove o efeito das massas entre a estação e o geoide, assumindo que o espaço entre a superfície física e a do geoide seja preenchido uniformemente com massa, no caso de uma estação situada acima do geoide e uniformemente vazio, se a estação estiver abaixo do geoide. A anomalia isostática leva em conta a correção topo-isostática, a qual também considera a heterogeneidade de massa abaixo do geoide, entendida como massa de compensação da topografia acima do geoide (JAMUR et al., 2010).

A correção de terreno é utilizada em algumas das reduções aplicadas à aceleração da gravidade como, por

exemplo, na anomalia de Bouguer e na redução pelo método de Helmert (GEMAEL, 2002). Com a aplicação da correção de terreno nas anomalias gravimétricas, as massas externas ao geóide são verticalmente comprimidas sob a superfície do geóide, alterando o potencial gravitacional da Terra. Atualmente, o cálculo dessa correção tem sido possível, de forma sistemática, com a utilização de modelos digitais do terreno (MDTs) locais ou globais (JAMUR et al., 2010), pois as altitudes são fornecidas em grades de diferentes tamanhos que proporcionam o uso dos modelos topográficos de massa linear e de prismas retangulares, através do uso da FFT (*Fast Fourier Transform*) na fórmula da correção de terreno.

Nesse trabalho utilizaram-se os programas TC2DFTPL e TCFOUR, juntamente com os dados provenientes dos MDTs do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Global Digital Elevation Model* (GDEM) para o cálculo da correção de terreno a ser aplicada nas observações gravimétricas do Estado do Rio Grande do Sul.

2. CORREÇÃO DE TERRENO (CT)

As observações gravimétricas realizadas na superfície do terreno são fortemente afetadas pela topografia; sendo o seu efeito tanto maior quanto maior for a elevação onde a estação de medição se encontra.

A correção de terreno tem por objetivo regularizar a superfície topográfica, obtendo assim uma topografia definida por um platô com a altitude da estação de medição e com densidade constante, chamado de Platô de Bouguer.

Como o Platô de Bouguer possui espessura constante e equivalente à altitude da estação P, podem ocorrer massas no entorno desse ponto que não são consideradas ou que são removidas sem que existam. Assim, o valor da gravidade observado torna-se menor que o real, fazendo com que as correções para o efeito das irregularidades do terreno, em relação ao plano da altitude da estação, sejam sempre positivas (LOBIANCO, 2005). Para que esse problema seja resolvido e a anomalia de Bouguer refinada, faz-se necessário a adição de uma componente devido às massas topográficas que não foram consideradas acima da estação P e uma componente para corrigir a massa considerada, de forma incorreta, abaixo dessa estação (Fig. 1) (MATOS, 2005). Portanto, a correção de terreno assume valores sempre positivos (em aproximações planas (FORSBERG, 1984)), aumentando assim o valor da gravidade observado.

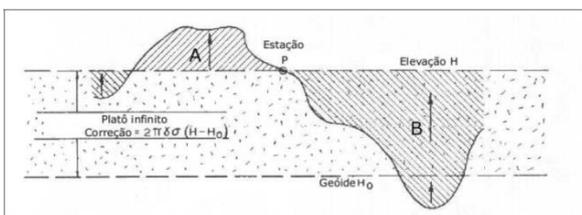


Figura 1 – Correção do Terreno
Fonte: Adaptado de Matos (2005).

Hammer (1939) desenvolveu um sistema para avaliação da correção de terreno (LOBIANCO, 2005). O método de Hammer para a correção de terreno considera a divisão da área ao redor da estação em zonas e compartimentos circulares (MATOS, 2005). A diferença de altitude entre o ponto de cálculo e cada compartimento ao seu redor é estimada, possibilitando o cálculo do efeito dessas massas na estação. Os raios e o número de compartimentos que cada zona de Hammer está dividida estão tabelados. Assim, a contribuição da correção de terreno para um ponto é dada pela soma dos valores tabelados para cada zona (LOBIANCO, 2005). A curvatura da Terra é ignorada nas Tabelas de Hammer, pois seu efeito é praticamente desprezível dentro da área coberta pelas tabelas; somente no centro da zona M a curvatura terrestre começa a ser considerável. A densidade do material de superfície adotada nas Tabelas de Hammer é de 2,0 g/cm³; para outra densidade, a correção total de terreno determinada pelas tabelas deve ser multiplicada pelo fator: densidade dividido por dois (LOBIANCO, 2005).

A fórmula clássica da correção de terreno é dada por (MATOS, 2005):

$$c(x_p, y_p) = \frac{G\rho R^2}{2} \iint_E \frac{[h(x,y) - h(x_p, y_p)]^2}{l^3(x_p - x, y_p - y)} dx dy \quad (1)$$

onde G é a constante gravitacional de Newton;

ρ é a densidade das massas topográficas assumida constante e igual a 2,67 g.cm⁻³;

R é o raio de uma esfera aproximada ao geóide global;

(x_p, y_p) é a coordenada do ponto de cálculo;

(x, y) são as coordenadas dos pontos do MDT;

h é a altitude do ponto acima do nível médio do mar;

E denota a área de integração da superfície;

$l(x_p - x, y_p - y)$ é o *kernel* definido como uma distância entre os pontos (x_p, y_p) e (x, y) :

$$l(x_p - x, y_p - y) = [(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2]^{0,5} \quad (2)$$

O método de Hammer e a Eq. 1 geram resultados idênticos. O método de Hammer, embora eficiente, consome muito tempo e está sujeito a erro humano; além de se mostrar inviável na obtenção da correção de terreno de uma quantidade grande de pontos, como é o caso do cálculo de modelos regionais locais (LOBIANCO, 2005). Uma alternativa rápida e automatizada para a obtenção da correção de terreno em escalas pequenas se dá através da utilização de programas que avaliam a Eq.1 como uma integral de convolução sobre uma grade regular de MDT, usando a transformada rápida de Fourier (FFT-2D). Isto é possível através da relação:

$$F\{a * b\} = F\{a\}F\{b\} \quad (3)$$

onde $a * b$ é chamada de convolução das funções a e b , e $F\{a\}$ e $F\{b\}$ são as transformadas de Fourier de a e b , respectivamente (MATOS, 2005). A Eq.3 é aplicada à

Eq.1, onde a função a é o termo $[h(x, y) - h(x_p, y_p)]^2$ e a função b corresponde a $l^{-3}(x_p - x, y_p - y)$.

O uso da FFT-2D no cálculo da correção de terreno reduz, de forma considerável e eficaz, o tempo de cálculo, o processo laborioso e os erros humanos envolvidos na manipulação dos gabaritos de Hammer (LOBIANCO, 2005). Mais detalhes sobre o uso da FFT no cálculo do efeito do terreno podem ser encontrados em Forsberg (1984).

A correção de terreno assume valores relativamente pequenos. Em escala regional pode ser negligenciada, desde que a topografia seja plana ou moderada. No entanto, em escala local, ela precisa ser considerada, pois as anomalias envolvidas, neste caso, normalmente são pequenas. Em áreas montanhosas, com altitudes por volta de 3.000 m, a correção de terreno também precisa ser considerada, pois, nesta situação, pode assumir valores da ordem de 50 mGal (LOBIANCO, 2005).

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1 Área de estudo

A área de estudo (Fig. 2), para a realização desse trabalho, situa-se na porção sul do Brasil e corresponde ao Estado do Rio Grande do Sul (RS). O RS abrange uma área total de 281.730,223 km² (ESTADOS@, 2014) e está compreendido entre as latitudes 33°43'S e 27°05'S e as longitudes 49°42'W e 57°40'W.



Figura 2 – Mapa da localização da Área de Estudo.
Fonte: Adaptado de Xavier (2009).

3.2 Dados utilizados

3.2.1 Dados altimétricos do SRTM

O SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) é um projeto internacional liderado pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com o objetivo de produzir um modelo topográfico digital de alta resolução

para a Terra (NASA, 2013). Essa missão foi executada pelo ônibus espacial *Endeavour*, durante o período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, cobrindo cerca de 80% da superfície terrestre (área compreendida entre as latitudes 60°N e 56°S), com resolução espacial de um segundo de arco (1"), o que corresponde a aproximadamente 30 metros. O método de aquisição dos dados altimétricos usado foi a interferometria por radar, que consiste na comparação de duas imagens de radar tomadas de pontos ligeiramente diferentes para obtenção da elevação. Para a realização desse procedimento, o ônibus espacial *Endeavour* foi equipado com um mastro de 60 metros e duas antenas de recepção (banda C e banda X) que foram instaladas uma no compartimento de carga do ônibus espacial e a outra na ponta do mastro que se estendia para fora da espaçonave; isso possibilitou a aquisição dos dados em uma mesma órbita, garantindo assim a melhor qualidade dos mesmos (RODRIGUEZ et al., 2005). As imagens do SRTM possuem resolução de 30 metros para os Estados Unidos e 90 metros para os outros países; seu referencial altimétrico é o elipsóide WGS84 e seu modelo do geopotencial é representado pelo *Earth Gravitational Model 1996* (EGM96). Os dados do SRTM para o Brasil estão disponíveis, de forma gratuita, para download no sítio do Centro de Ecologia da UFRGS: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>.

Uma avaliação da qualidade dos dados altimétricos do SRTM feita para o Estado do RS pode ser encontrada em Lemos et al. (2004) e para o Brasil e a Argentina em Blitzkow et al. (2007). Os resultados preliminares da análise da qualidade dos dados altimétricos derivados do SRTM para uma área dentro do Estado do RS, obtidos por Lemos et al. (2004), demonstraram que, para muitas aplicações, o SRTM pode substituir os MDTs obtidos a partir de mapas topográficos na escala 1:250.000.

3.2.2 Dados altimétricos do ASTER GDEM

O *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Global Digital Elevation Model* (GDEM) foi desenvolvido em conjunto pelo METI (*Ministry of Economy, Trade and Industry*) do Japão e pela NASA (*United States National Aeronautics and Space Administration*). O ASTER GDEM contribuiu para o GEOSS (*Global Observation System of Systems*) e está disponível gratuitamente para os usuários via download nos sítios do ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*) do Japão e da LP DAAC (*NASA's Land Processes Distributed Active Archive Center*). Para esse trabalho os dados ASTER para a área de estudo foram adquiridos no sítio do ERSDAC: <<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/search.jsp>>.

O ASTER foi construído pelo METI e lançado através da nave espacial Terra da NASA, em dezembro de 1999. Possui, ao longo da sua trajetória, capacidade estereoscópica através do uso da banda espectral do infravermelho próximo e resolução espacial de 15 m no plano horizontal. Cobriu a área da superfície terrestre compreendida entre as latitudes 83°N e 83°S (22.600 áreas de 1°x1° - foram incluídas áreas que continham, pelo

menos, 0,01% da superfície terrestre); está no formato GeoTIFF, com coordenadas geográficas lat/long e grid de 1" de arco (~30 m); seu referencial altimétrico é o WGS84 e seu modelo do geopotencial é representado pelo EGM96 (GISAT, 2014).

A metodologia utilizada para a sua produção envolveu o processamento automatizado de todo o arquivo de cenas ASTER (1,5 milhões de cenas). Fez-se uso da estéreo-correlação para a produção de 1.264.118 cenas-base ASTER DEMs individuais; máscara de nuvem para remoção de pixels ruins; junção de todas as nuvens DEMs selecionadas, removendo os valores residuais ruins e os *outliers*; uso da média dos dados selecionados para definição dos valores de pixels finais e correção das anomalias residuais antes do particionamento dos dados em áreas de 1°x1° (GISAT, 2014).

Produções prévias estimam (mas não garantem) uma acurácia para esse produto global de 20 m com 95% de confiança para os dados verticais e 30 m com 95% de confiança para os dados horizontais (GISAT, 2014).

Em Druzina (2007) encontra-se uma comparação entre os MDTs gerados para o município de Porto Alegre/RS a partir de diferentes dados (Cartas topográficas na escala 1:50.000, ASTER e SRTM) com os MDTs da verdade terrestre. Os resultados estatísticos destas avaliações demonstraram que o MDT ASTER foi o modelo que apresentou o menor Erro Médio Quadrático em Área Acidentada (6,522 m) e o segundo menor Erro Médio Quadrático em Área Plana (4,626 m) e em Área Mista (6,698 m).

3.3. Programas utilizados

3.3.1. TC2DFTPL

O programa em FORTRAN77, chamado TC2DFTPL, desenvolvido por Sideris (1985) e Li e Sideris (1994), utiliza a Eq. 1 como uma integral de convolução sobre uma grade regular de MDT e calcula a correção de terreno via FFT-2D (MATOS, 2005). Para o programa rodar é preciso informar: o nome do arquivo que contém as altitudes, o número de linhas e colunas e as resoluções, em quilômetros, em x (dx_km) e y (dy_km) do arquivo. As informações número de linhas e colunas e as resoluções devem ser colocadas na primeira linha do arquivo das altitudes, separadas por espaço; depois deve-se informar ao programa a ordem em que estas informações estão dispostas no arquivo das altitudes. Após o processamento dos dados pelo programa, três arquivos de saída são produzidos: o primeiro é a correção de terreno a ser aplicada nos dados gravimétricos considerando o modelo topográfico como tendo a massa concentrada num prisma; o segundo é a correção de terreno a ser aplicada nos dados gravimétricos considerando o modelo topográfico de massa linear e o terceiro arquivo faz uma média entre os dois arquivos de saída anteriores.

Nesse trabalho, para o cálculo da correção de terreno pelo programa TC2DFTPL, considerou-se o modelo topográfico como tendo a massa concentrada num prisma.

3.3.2. TCFOUR

O TCFOUR é um programa da IAG *International Geoid School* e faz parte do conjunto GRAVSOFT (JAMUR; de FREITAS, 2012). Esse programa utiliza duas grades de MDTs com resoluções diferentes para o cálculo da correção de terreno. A primeira grade, chamada de grade detalhada ou de alta resolução, é a que recupera a maior parte do efeito do terreno sobre a grandeza do campo da gravidade devido à proximidade do ponto de cálculo, e é considerada até um raio R_0 . A segunda grade é a chamada grade de referência, a qual funciona como um filtro passa alta (JAMUR; de FREITAS, 2012). Para o programa rodar é preciso informar os nomes dos arquivos que contém os dados de entrada, nessa ordem: grade detalhada; grade de referência; nome do arquivo de saída; opção do que se quer calcular (opção 3 para correção de terreno); raio (em km) de consideração no cálculo; número de linhas e colunas do arquivo. O programa TCFOUR calcula a correção de terreno via FFT para uma aproximação plana (FORSBERG; TSCHERNING, 2008) e gera um arquivo de saída.

Nesse trabalho, as grades de maior resolução utilizadas foram de 10 km, 5 km, 2 km e 1 km extraídas dos MDTs do SRTM (com resolução espacial de 90 m) e do ASTER (com resolução espacial de 30 m), utilizando um $R_0 = 999$ km. A resolução das grades de referência utilizadas foi de 20 km, também extraídas dos MDTs do SRTM e do ASTER.

3.4. Cálculo da CT através dos programas TC2DFTPL e TCFOUR

O cálculo da correção de terreno através dos programas TC2DFTPL e TCFOUR foi feito utilizando os dados dos MDTs do SRTM e do ASTER com resoluções de 20 km, 10 km, 5 km, 2 km e 1 km. Nesses programas foi calculada a CT para os MDTs do SRTM e do ASTER nas resoluções de 10 km, 5 km, 2 km e 1 km. O MDT com resolução de 20 km foi utilizado como grade de referência no programa TCFOUR.

No programa TC2DFTPL, para os MDTs do SRTM, foi necessário dividir a área do RS apenas para o modelo de 1 km. Assim, a área do RS foi dividida em quatro partes. Já para os MDTs do ASTER foi necessário dividir a área de estudo para os modelos de 2 km e 1 km. Assim, a área de estudo foi dividida, respectivamente, em duas e nove partes.

No programa TCFOUR, para os MDTs do SRTM, não foi necessário dividir a área do RS para nenhum dos modelos. Já para os MDTs do ASTER foi necessário dividir a área de estudo para o modelo de 1 km. Assim, a área do RS foi dividida em quatro partes.

Após o cálculo da CT pelos programas, pode-se notar que o programa TCFOUR apresentou efeito de borda para a área de estudo e para as divisões necessárias da área de estudo. Ao contrário do programa TC2DFTPL, que não apresentou efeito de borda em nenhuma situação.

A divisão da área de estudo foi necessária devido à limitação da capacidade de processamento dos dados pelos programas para calcular a transformada de Fourier em uma única convolução. Na Tab. 1 é possível verificar para quais resoluções de MDTs foi necessário compartimentar a área de estudo.

Tabela 1 – Necessidade de compartimento da área de estudo para o cálculo da CT pelos programas.

Programa	Resolução MDT	SRTM	ASTER
TC2DFTPL	10 km	Não	Não
	5 km	Não	Não
	2 km	Não	Sim
	1 km	Sim	Sim
TCFOUR	10 km	Não	Não
	5 km	Não	Não
	2 km	Não	Não
	1 km	Não	Sim

3.5. Comparação da CT calculada pelos programas TC2DFTPL e TCFOUR

Com o intuito de verificar se a região do Estado em que a correção de terreno assume os valores mais elevados mudava conforme a utilização de um MDT com resolução diferente, no cálculo da CT, comparou-se a CT calculada pelos programas TC2DFTPL e TCFOUR utilizando os MDTs do SRTM e do ASTER nas resoluções de 5 km, 2 km e 1 km com a CT calculada por esses programas utilizando os MDTs na resolução de 10 km.

As Fig. 3, 4 e 5 trazem, respectivamente, a comparação (em vermelho) entre a CT calculada pelo programa TC2DFTPL utilizando os MDTs do SRTM com resoluções de 5 km, 2 km e 1 km com a CT calculada por esse programa utilizando o MDT de 10 km.

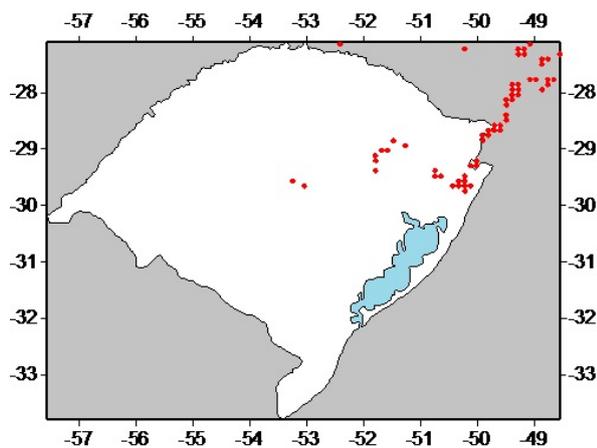


Figura 3 – TC2DFTPL_SRTM: 5 km x 10 km

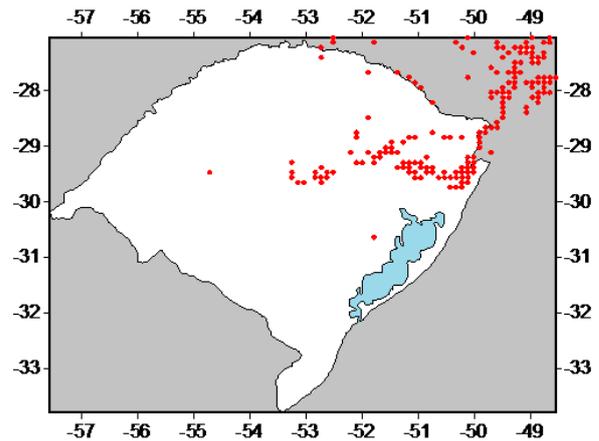


Figura 4 – TC2DFTPL_SRTM: 2 km x 10 km

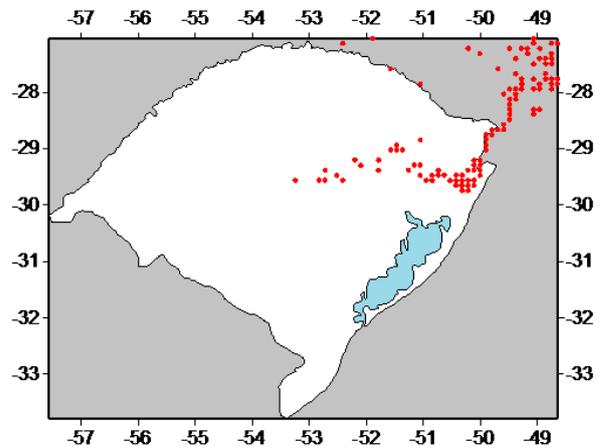


Figura 5 – TC2DFTPL_SRTM: 1 km x 10 km

As Fig. 6, 7 e 8 trazem, respectivamente, a comparação (em vermelho) entre a CT calculada pelo programa TCFOUR utilizando os MDTs do SRTM com resoluções de 5 km, 2 km e 1 km com a CT calculada por esse programa utilizando o MDT de 10 km.

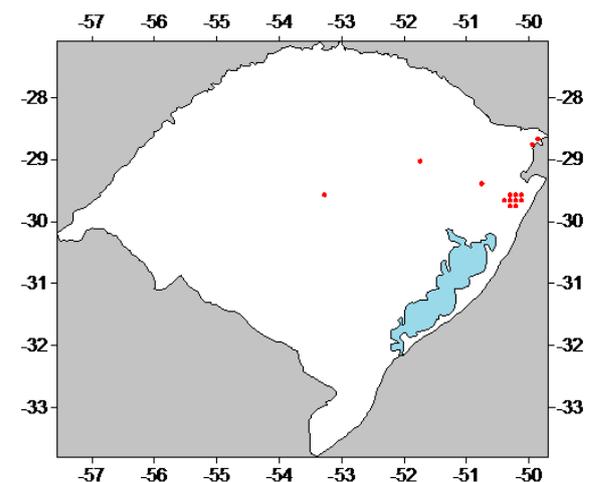


Figura 6 – TCFOUR_SRTM: 5 km x 10 km

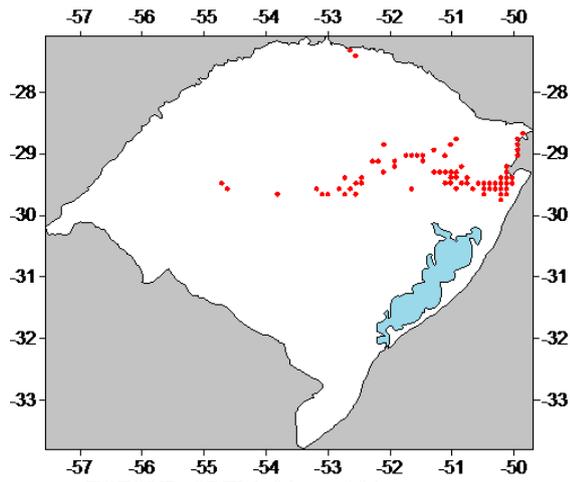


Figura 7 – TCFOUR_SRTM: 2 km x 10 km

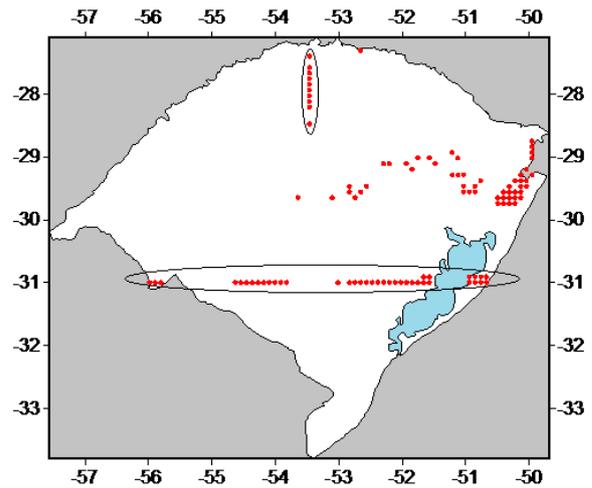


Figura 9 – TCFOUR_ASTER: 1 km x 10 km

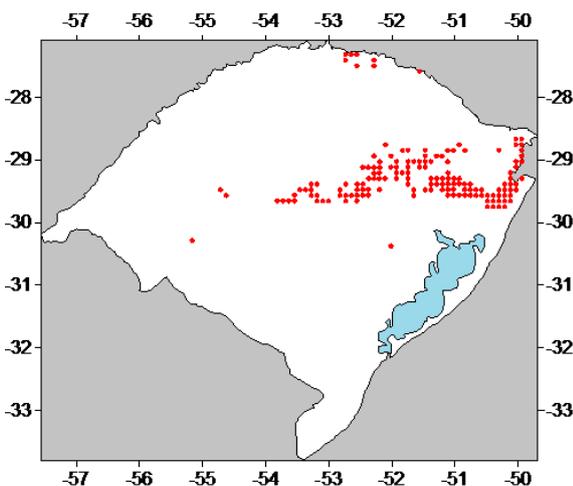


Figura 8 – TCFOUR_SRTM: 1 km x 10 km

Através das Fig. 3 a 8, percebe-se que as diferenças (em vermelho) maiores que 0,9 mGal (em módulo) entre as correções de terreno para o modelo de menor resolução (10 km) e os de maior resolução (5 km, 2 km e 1 km) concentram-se na região do RS que compreende as altitudes mais elevadas do Estado, a qual é denominada Serra Geral.

A comparação das CTs calculadas com os MDTs do ASTER foi feita da mesma forma e os resultados obtidos foram similares aos obtidos com os MDTs do SRTM. Observou-se que as diferenças maiores que 0,9 mGal (em módulo) entre as CTs calculadas para o modelo de menor resolução (10 km) e os de maior resolução (5 km, 2 km e 1 km) também concentram-se na região da Serra Geral e pode-se observar o efeito de borda nas subdivisões feitas na área de estudo para o modelo de 1 km. A Fig. 9 mostra em vermelho a diferença entre as CTs calculadas utilizando o MDT do ASTER com resolução de 1 km e utilizando o MDT do ASTER com resolução de 10 km e, circulado em preto, o efeito de borda observado nas divisões da área de estudo.

Após, comparou-se a CT calculada por ambos os programas utilizando os MDTs do SRTM nas resoluções de 10 km, 5 km, 2 km e 1 km. As diferenças entre as CTs são mostradas em vermelho nas Fig. 10, 11 e 12, respectivamente.

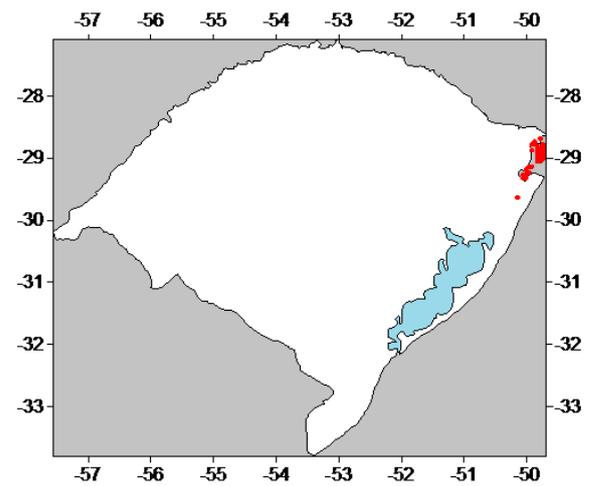


Figura 10 – TC2DFTPL x TCFOUR_SRTM: 5 km x 5 km

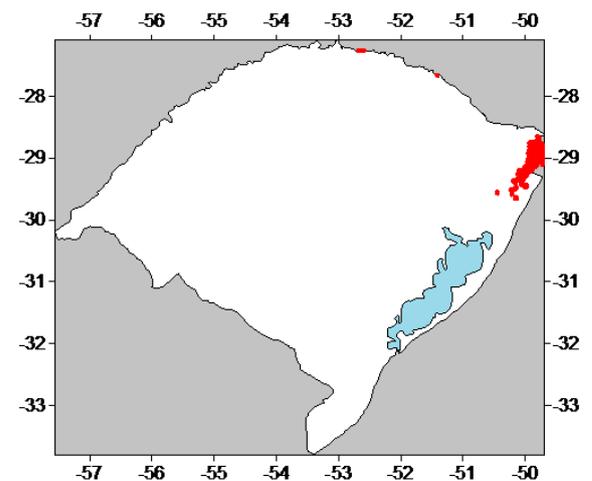


Figura 11 – TC2DFTPL x TCFOUR_SRTM: 2 km x 2 km

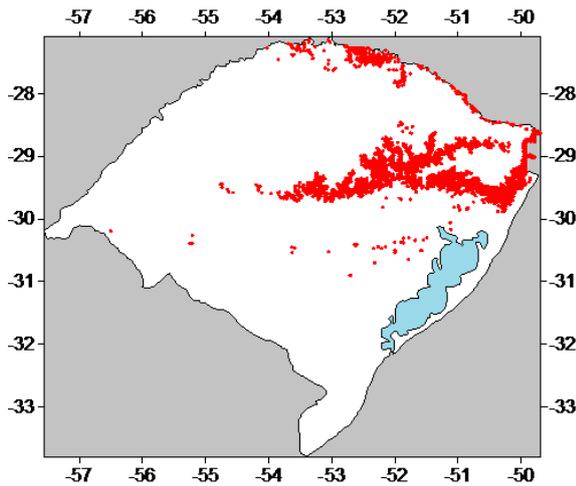


Figura 12 – TC2DFTPL x TCFOUR_SRTM: 1 km x 1 km

As correções de terreno calculadas pelos dois programas para o modelo de 10 km são similares, pois não foi identificada nenhuma diferença acima de 1 mGal (em módulo). Através da análise da Fig. 10, percebe-se que as CTs calculadas pelos dois programas para o modelo de 5 km também são similares, pois as diferenças maiores que 1 mGal (em módulo) aparecem em pouca quantidade e concentram-se no limite nordeste do Estado do RS. No entanto, analisando as Fig. 11 e 12, percebe-se que as diferenças maiores que 1 mGal (em módulo) entre os modelos de 2 km e 1 km aparecem em maiores quantidades que as do modelo de 5 km e concentram-se na região da Serra Geral do Estado do RS.

Assim como foi verificado utilizando os MDTs do SRTM, constatou-se que as CTs calculadas pelos dois programas utilizando os MDTs do ASTER para o modelo de 10 km são similares, pois não foi identificada nenhuma diferença acima de 1 mGal (em módulo) e que as diferenças maiores que 1 mGal (em módulo) entre os modelos de 5 km, 2 km e 1 km também concentram-se na região da Serra Geral. Na Fig. 13 podem-se visualizar, em vermelho, as diferenças entre as CTs calculadas por ambos os programas para o modelo de 1 km do ASTER e, circulado em preto, o efeito de borda observado nas divisões feitas na área de estudo.

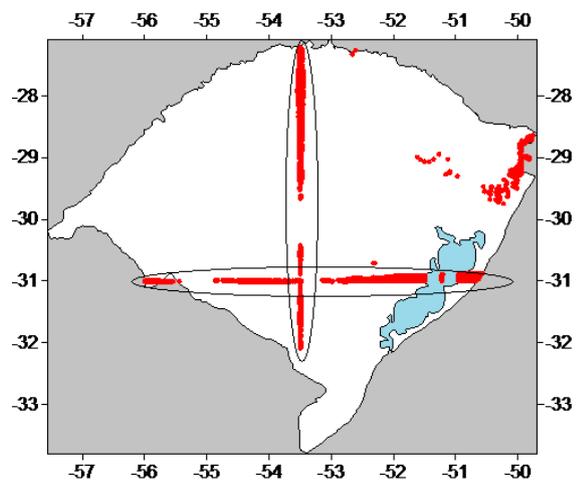


Figura 13 – TC2DFTPL x TCFOUR_ASTER: 1 km x 1 km

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estatísticas da correção de terreno, calculada pelos programas TC2DFTPL e TCFOUR, utilizando os dados do SRTM e do ASTER, podem ser vistas nas Tab. 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2 – Estatísticas da CT, calculada pelo programa TCFOUR, utilizando os MDTs do SRTM.

Estatísticas (mGal)	SRTM			
	TCFOUR			
	Resolução MDT			
	10 km	5 km	2 km	1 km
Mínimo	0,0124	0,0130	0,0150	-0,1792
Máximo	3,2260	6,4740	12,3951	17,6582
Média	0,1529	0,1971	0,2831	0,3271
Desvio Padrão	0,2466	0,3468	0,5459	0,6975

Tabela 3 – Estatísticas da CT, calculada pelo programa TCFOUR, utilizando os MDTs do ASTER.

Estatísticas (mGal)	ASTER			
	TCFOUR			
	Resolução MDT			
	10 km	5 km	2 km	1 km
Mínimo	0,0120	0,0130	-0,0730	0,0010
Máximo	3,5070	6,0780	13,8210	11,6769
Média	0,1595	0,2048	0,2893	0,3024
Desvio Padrão	0,2571	0,3772	0,5927	0,5963

Analisando as Tab. 2 e 3, percebe-se que a CT calculada pelo programa TCFOUR, utilizando o MDT do SRTM com resolução de 1 km e utilizando o MDT do ASTER com resolução de 2 km, apresenta valor mínimo inconsistente (negativo). Além disso, as estatísticas da CT para o MDT com resolução de 1 km do ASTER (Tab. 3), calculado pelo programa TCFOUR, apresenta seus valores comprometidos devido à presença do efeito de borda nas divisões da área de estudo (Fig. 13).

Tabela 4 – Estatísticas da CT, calculada pelo programa TC2DFTPL, utilizando os MDTs do SRTM.

Estatísticas (mGal)	SRTM			
	TC2DFTPL			
	Resolução MDT			
	10 km	5 km	2 km	1 km
Mínimo	0,0020	0,0020	0,0020	0
Máximo	7,0610	10,9790	20,1380	13,1037
Média	0,1160	0,1522	0,2120	0,1715
Desvio Padrão	0,3050	0,4252	0,6106	0,4981

Tabela 5 – Estatísticas da CT, calculada pelo programa TC2DFTPL, utilizando os MDTs do ASTER.

Estatísticas (mGal)	ASTER			
	TC2DFTPL			
	Resolução MDT			
	10 km	5 km	2 km	1 km
Mínimo	0,0010	0,0010	0,0010	0
Máximo	6,4380	10,4510	10,7467	13,2143
Média	0,1004	0,1302	0,1402	0,1200
Desvio Padrão	0,2697	0,3868	0,4531	0,4154

Analisando as Tab. 4 e 5, percebe-se que a CT calculada pelo programa TC2DFTPL, utilizando os MDTs do SRTM e do ASTER não apresenta valores negativos, como observado na CT calculada pelo programa TCFOUR (Tab. 2 e Tab. 3). No entanto, os valores mínimo e máximo para o MDT do SRTM com resolução de 1 km (Tab. 4) e para o MDT do ASTER com resoluções de 2 km e 1 km (Tab. 5) são subestimados, devido à necessidade de compartimentar a área de estudo para essas resoluções.

Para efeito de comparação entre as estatísticas da correção de terreno calculadas pelos dois programas, o efeito de borda foi desconsiderado. Assim, nota-se que existe uma relação diretamente proporcional entre a resolução do modelo digital de terreno utilizado no cálculo da correção de terreno e o valor da correção a ser aplicado nos dados gravimétricos: à medida que a resolução do MDT utilizado aumenta, a correção de terreno a ser aplicada nos dados gravimétricos também aumenta. Isso ocorre, pois quanto mais denso o MDT, maior é a quantidade de informação que se tem sobre a área de estudo e, por isso o valor da CT aumenta. No entanto, isso não ocorre quando se faz necessário dividir a área de estudo (ver Tab. 1) para que se torne possível o cálculo da CT pelos programas. Assim, nos casos em que seja necessário dividir a área de estudo, o valor da correção de terreno calculada será subestimado (principalmente as correções calculadas pelo programa TC2DFTPL, como pode ser verificado através das Tab. 4 e 5). Quando a área de estudo é dividida, a CT é subestimada devido ao programa não conseguir processar todos os dados em uma única vez. Assim, quanto maior a quantidade de dados, maior é a suavização na determinação da CT.

Nas Tab. 6 e 7 podem ser vistas, respectivamente, as estatísticas referentes à comparação entre as CTs calculadas pelos programas TC2DFTPL e TCFOUR para as diferenças encontradas maiores que 1 mGal (em módulo), para os MDTs do SRTM e do ASTER nas resoluções de 10 km, 5 km, 2 km e 1 km.

Tabela 6 – Estatística da comparação entre as CTs calculadas pelos programas utilizando os MDTs do SRTM.

Estatística (mGal)	TC2DFTPL x TCFOUR			
	SRTM			
	Resolução MDT			
	10 km	5 km	2 km	1 km
Mínimo	-0,9314	-2,7299	-7,9367	-2,9363
Máximo	0,4700	1,6162	6,0104	11,3941
Média	0,0010	0,2553	0,8731	1,8465
Desvio Padrão	0,0471	1,5334	2,2456	1,1058

Tabela 7 – Estatística da comparação entre as CTs calculadas pelos programas utilizando os MDTs do ASTER.

Estatística (mGal)	TC2DFTPL x TCFOUR			
	ASTER			
	Resolução MDT			
	10 km	5 km	2 km	1 km
Mínimo	-0,7390	1,0010	-5,4507	-5,6386
Máximo	0,4126	4,7716	5,8827	11,6750
Média	-0,0046	1,6959	1,7415	2,3872
Desvio Padrão	0,0425	0,6404	1,3191	1,9927

Através das Tab. 6 e 7, verifica-se que para o modelo de 10 km, tanto para o MDT do SRTM como do ASTER, não foram encontradas diferenças maiores que 1 mGal (em módulo) entre as CTs calculadas por ambos os programas. No entanto, para as demais resoluções (5 km, 2 km e 1 km) foram encontradas diferenças maiores que 1 mGal (em módulo), aparecendo em maiores quantidades nas resoluções de 2 km e 1 km (como verificado nas Fig. 11 e 12) e em menores quantidades na resolução de 5 km (como verificado na Fig. 10).

6. CONCLUSÃO

Ao final das avaliações pode-se concluir que os programas TC2DFTPL e TCFOUR, para o cálculo da correção de terreno, são similares e que os valores da CT calculados a partir do uso de MDTs com resolução de 5 km serão subestimados, pois para resoluções maiores (2 km e 1 km) ambos os programas não detectam a melhora do MDT. Isso é considerado um problema quando o objetivo for determinar geoides locais.

No entanto, aconselha-se a utilização do programa TC2DFTPL para o cálculo da correção de terreno. Isso é devido ao programa TC2DFTPL não apresentar efeito de borda, ao contrário do programa TCFOUR. Porém, deve-se tomar cuidado com sua utilização quando a área em estudo for muito extensa e se fizer necessário compartimentá-la; pois, como pode ser verificado nas Tab. 4 e 5, os resultados apresentados serão subestimados, devido à necessidade de dividir a área de estudo.

Concluiu-se também, através das Tab. 6 e 7, que os resultados das estatísticas de comparação entre os valores máximos e mínimos obtidos para a correção de terreno, calculada por ambos os programas, utilizando os MDTs do SRTM e do ASTER nas resoluções de 5 km, 2 km e 1 km se devam à necessidade de dividir a área de estudo para as maiores resoluções e também às diferenças altimétricas entre os dois MDTs; diferenças essas, que são mais evidentes na região das maiores altitudes, como é o caso da região da Serra Geral.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte de um projeto mais amplo sobre a determinação e avaliação do geóide no Estado do Rio Grande do Sul. Esse projeto conta com o apoio do CNPq na forma de fomento a projeto de pesquisa, através do apoio financeiro recebido em forma de Bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq-UFRGS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; CINTRA, J. P. SRTM evaluation in Brazil and Argentina with emphasis on the Amazon region. *International Association of Geodesy Symposia*. v.130, p. 266-271, 2007.
- DRUZINA, A. G. S. Integração de dados altimétricos obtidos através de diferentes técnicas para geração de um novo modelo digital de elevação. Porto Alegre, 2007. 79p. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FORSBERG, R. A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modeling. *Scientific Report No. 5*, p. 33-69, 1984.
- FORSBERG, R.; TSCHERNING, C. C. An overview manual for the GRAVSOFT. *Geodetic Gravity Field Modelling Programs*. Dinamarca, 2008. 2ed. 75p.
- GEMAEL, C. Introdução à Geodésia Física. Curitiba. UFPR, 2002. 304p.
- GISAT. 2014. ASTER GDEM Readme File. Disponível em: <<http://www.gisat.cz/content/en/products/digital-elevation-model/aster-gdem>>. Acesso em 06/01/2014.
- HAMMER, S. Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, v.4, p. 184-194, 1939.
- ESTADOS@. 2014. Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rs>>. Acesso em 17/12/2014.
- JAMUR, K. P.; PEREIRA, R. A. D.; de FREITAS, S. R. C.; MIRANDA, F. D. A.; FERREIRA, V. G. Avaliação da correção gravimétrica do terreno obtida de modelos digitais de elevação associados ao SGB e ao EGM2008. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. p. 001-005, 2010.
- JAMUR, K. P.; de FREITAS, S. R. C. Estudo de alternativas para combinar altimetria e gravimetria por satélites para uso em regiões de baixa cobertura gravimétrica convencional. III Simpósio Brasileiro de Geomática. p. 280-295, 2012.
- LEMO, M. C.; SOUZA, S. F.; ROCHA, R. S. Avaliação da qualidade dos dados altimétricos derivados do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM): Resultados Preliminares. Anais I Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2004. Disponível em: <<http://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f008.pdf>>. Acesso em 26/11/2013.
- LI, Y. C.; SIDERIS, M. G. Improved gravimetric terrain corrections. *Geophysical Journal International*, v. 119, p. 740-752, 1994.
- LOBIANCO, M. C. B. Determinação das alturas do geóide no Brasil. São Paulo, 2005. 165p, p. 61-69. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- NASA. 2013. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em 24/01/2013.
- MATOS, A. C. O. C. Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de Geodésia e Geofísica na América do Sul. São Paulo, 2005. 355p. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E.; CHAPIN, E. C.; MARTIN, J. M.; DAFFER, W.; HENSLEY, S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639, *Jet Propulsion Laboratory*. Pasadena, Califórnia, 2005. 143p.
- SIDERIS, M. G. A fast fourier transform method of computing terrain corrections. *Manuscripta Geodaetica*, v. 10, p. 66-73, 1985.
- XAVIER, M.B. Detecção de erros grosseiros em banco de dados gravimétrico terrestre do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009. 103p. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.