

Maria Cristina Barboza Lobianco

Determinação das alturas
do geóide no Brasil

São Paulo – SP

2005

MARIA CRISTINA BARBOZA LOBIANCO

Determinação das alturas do geóide no Brasil

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Ênfase:

Informações Espaciais

Orientador:

Prof. Dr. Denizar Blitzkow

São Paulo

2005

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de setembro de 2005.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Lobianco, Maria Cristina Barboza
Determinação das alturas do geóide no Brasil / M.C.B. Lobianco. - São Paulo, 2005.
165 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Geociências 2.Geodésia física 3.Gravimetria I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Dedico esta tese aos meus pais, Jorge e Zulmira, que, através de seus exemplos, me ensinaram os valores que julgo mais importantes em minha vida. A eles também agradeço o incentivo à fé em Deus, à dedicação à família, ao trabalho, ao estudo, à consideração e respeito aos meus semelhantes e ao otimismo que me faz querer ver o lado bom em cada pessoa e acontecimento.

Dedico esta tese igualmente ao meu marido, Ricardo, que, incessantemente, supera todas as minhas boas expectativas e que tem sido a minha alegria, a minha força e a minha inspiração. Agradeço a ele por todos os momentos, bons e difíceis, que compartilhou comigo, até mesmo esquecendo-se de si próprio. A ele, o meu amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos meus bens maiores: Seu amor, minha família, meus amigos e a vida;

ao meu marido, Ricardo; aos meus pais, Jorge e Zulmira; ao meu sogro e à sua esposa, Gonzalo e Zeni; aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, que sempre permaneceram ao meu lado, incentivando, compreendendo e dando o amor e a força que são essenciais em minha vida;

ao meu irmão Luiz e à minha cunhada Roselene, que me acolheram em sua casa e em suas vidas em São Paulo e me fizeram sentir em casa e com o carinho de família desde o início de seu casamento;

ao Prof. Dr. Denizar Blitzkow, pela orientação, por compartilhar comigo seus conhecimentos, dificuldades e alegrias no esforço do estudo da gravimetria e do geóide. Principalmente, pelo apoio, amizade e parceria durante tantos anos, que têm sido fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional e sem os quais não teria sido possível alcançar meus objetivos;

a Eliane Valéria Napoli Blitzkow e a Bruno Blitzkow, pelo carinho com que me receberam tantas vezes em sua casa;

aos Prof. José Roberto Duque Novaes, Mauro Pereira de Mello e Camil Gemael, que primeiro fizeram com que me apaixonasse pela Geodésia;

a Fernando de Araújo Brandão Filho, Luiz Paulo Souto Fortes, Nilo César Coelho da Silva e Sonia Maria Alves Costa, chefes anteriores e atual da Geodésia no IBGE, que apoiaram e estimularam os meus estudos nessa instituição;

de modo muito especial, a Sylvio Pinho Ferreira, que me permitiu ingressar no programa de doutoramento, incentivando e valorizando meu trabalho;

aos colegas do IBGE que me apoiaram durante o meu doutoramento;

às equipes de campo de gravimetria, que fizeram um trabalho excepcional levantando gravimetricamente áreas remotas, e com enormes dificuldades logísticas, com dedicação e profissionalismo irrepreensíveis;

aos meus colegas Hélio Luiz Pinto de Azevedo, Carlos Alberto Correia e Castro Jr., Carlos Alberto Monteiro de Almeida e Marcelo Henrique Ferreira Barbosa pelo apoio e amizade e pelo grande trabalho que fazem;

à Kátia Duarte Pereira, amiga e irmã de tantos anos, que deixou uma saudade e um vazio enormes em minha vida, pelo carinho, amizade, convívio rico e questionador;

às minhas amigas Ilce de Oliveira Campos e Ana Cristina Cancoro de Matos, dois grandes presentes do doutorado, pela amizade, pelo carinho e por termos compartilhado nossas vidas, conhecimento, dificuldades e alegrias;

aos Prof. Nicola Pacileo Netto e Edvaldo Simões da Fonseca Jr. pelo convívio e carinho especiais;

aos Drs. Nelsi Côgo de Sá, do IAG/USP, e Mauro Andrade de Souza, do ON, companheiros de gravimetria com quem tenho grande prazer em trabalhar, cujas conversas e apoio me são sempre motivos de alegria, além de estímulo para seguir em frente;

à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), pela oportunidade de realização deste trabalho;

ao corpo docente e administrativo da EPUSP, pelo apoio, e aos meus colegas da pós-graduação, companheiros de estudos e de vida, e a quem desejo que continuem a se aperfeiçoar como seres humanos e profissionais;

ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela oportunidade de realização do curso de doutorado e por ter me permitido implantar as atividades relacionadas à gravimetria sistemática e à determinação do geóide na instituição;

ao Dr. Ken McConnel, do *Geological Survey of Canada* (GSC), pela generosidade com que me recebeu em sua instituição, compartilhando os fundamentos teóricos, conselhos técnicos e administrativos para que a gravimetria sistemática pudesse ser implantada no IBGE;

ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa durante parte do meu curso, o que viabilizou a minha permanência em São Paulo e a realização desta pesquisa;

aos sistemas computacionais de uso livre *Generic Mapping Tools* (GMT) (WESSEL; SMITH, 1998) e WinShell, interface gráfica para trabalhar com o LaTeX ou TeX, pela facilidade por eles proporcionada, que permitiu a confecção das figuras aqui apresentadas, bem como a redação do próprio texto; e

aos pioneiros da internet e *world wide web*, Joseph Carl Robnett Licklider, Vinton Cerf e Sir Timothy John “Tim” Berners-Lee, que provocaram uma revolução na comunicação e na disponibilidade de informações, permitindo o rompimento das fronteiras de tempo, espaço, cultura e línguas e tornando possível um grau de compartilhamento de conhecimentos nunca antes alcançado.

Resumo

LOBIANCO, M.C.B. **Determinação das alturas do geóide no Brasil**. 2005. 165 f. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Em função da rapidez e precisão na obtenção de coordenadas, o *Global Positioning System* (GPS) revolucionou o posicionamento espacial. Entretanto, a maior necessidade em aplicações nas áreas de Geodésia, Geofísica e Engenharia, em termos de altitude, é voltada para a altitude ortométrica e não para a elipsoidal (determinada por GPS). Um modelo de ondulação geoidal mais acurado possibilitaria transformar altitudes elipsoidais em ortométricas, mantendo o mesmo nível de precisão da determinação GPS. Neste trabalho foram gerados modelos geoidais gravimétricos para o Brasil, GEOIDE2005 e STOKES2005, por meio da técnica “remover-calcular-repor” em conjunto com a modificação do núcleo da integral de Stokes proposta por Featherstone, no caso do cálculo por FFT, e a proposta por Vanicek e Kleusberg, para o cálculo por integração numérica. As informações gravimétricas utilizadas no cálculo, provenientes de diversas instituições brasileiras e sul-americanas, foram compiladas, validadas e homogeneizadas de modo a gerar uma malha de $10' \times 10'$ de anomalias médias de gravidade de Helmert, em continente, e ar-livre, nas áreas oceânicas. A contribuição dos longos comprimentos de onda do geóide, relativa à área externa à calota de integração, é fornecida por um modelo de geopotencial. A escolha desse modelo foi feita a partir de comparações de diferentes modelos de geopotencial para identificar o que melhor se ajusta ao país. O modelo digital de terreno foi selecionado a partir de estudos detalhados e foi utilizado para gerar valores de altitudes médias, reconstituir anomalias Bouguer em Helmert, calcular correção de terreno e efeito indireto. Foram organizadas e analisadas informações sobre estações que possuíam altitude elipsoidal, determinada por levantamentos GPS, e altitude ortométrica, obtidas por meio de nivelamento geométrico. A diferença entre essas duas altitudes forneceu as ondulações geoidais utilizadas para avaliação dos modelos de geopotencial e dos modelos geoidais aqui apresentados. Ao final, são relacionados os resultados das comparações, relatadas conclusões, levantadas as perspectivas futuras e sugeridas recomendações para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Geociências, Geodésia física, gravimetria.

Abstract

LOBIANCO, M.C.B. **Geoid heights determination in Brazil**. 2005. 165 f. Thesis (Doctoral)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

The Global Positioning System (GPS) generated a revolution on coordinates acquisition, considering quickness and precision. However, the major need in Geodesy, Geophysics and Engineering areas, regarding heights, is directed to orthometric height, not to ellipsoidal (determined by GPS). A more accurate geoid undulation model would allow the transformation of ellipsoidal to orthometric heights, keeping the same precision level of GPS determinations. This work generated gravity geoid models to Brazil, GEOIDE2005 and STOKES2005, using the “remove-restore” technique together with the modification of Stokes integral kernel proposed by Featherstone, in FFT computation, and the Vanicek and Kleusberg proposal, in numerical integration computation. The gravimetric informations used in the computations, from several Brazilian and South American organizations, were compiled, validated and homogenized to generate a $10' \times 10'$ Helmert mean gravity grid, on terrestrial areas, and free-air, on ocean. The geoid long wavelength contribution, related to integration cap's external area, is provided by a geopotential model. The choice of this model was done from comparisons of different geopotential models in order to identify the one that best fits to the country. The digital terrain model was selected from detailed studies and was used to generate mean height values, reconstitute Helmert anomalies from Bouguer, compute terrain correction and indirect effect. Informations about stations with ellipsoidal height, determined by GPS surveys, and orthometric height, obtained by spirit levelling, were organized and analyzed. The differences between these two heights provided the geoid undulations used to evaluate geopotential models and geoid models presented here. At the end, the results from comparisons and conclusions are informed, future perspectives are raised and recommendations are suggested. Keywords: Geosciences, physical Geodesy, gravity.

Lista de Figuras

Figura 1	Relação entre ψ , $d\psi$, α e $d\alpha$	39
Figura 2	Domínio de integração da fórmula de Stokes modificada	41
Figura 3	Modificação de Wong e Gore	49
Figura 4	Núcleo esferoidal de Wong e Gore	49
Figura 5	Modificação de Vanicek e Kleusberg	52
Figura 6	Reduções gravimétricas	56
Figura 7	Representação gráfica da camada de Bouguer	58
Figura 8	Modelo isostático de Pratt-Hayford	60
Figura 9	Modelo isostático de Airy-Heiskanen	61
Figura 10	Modelo isostático de Vening Meinesz	61
Figura 11	Modelos geométricos para correção de terreno	63
Figura 12	Possíveis magnitudes da CT e relação da CT com a anomalia de Bouguer	63
Figura 13	Efeitos topográfico e isostático	64
Figura 14	Gabarito e anéis de Hammer	65
Figura 15	Atração de um compartimento	65
Figura 16	Numeração dos blocos para correção de terreno na América do Sul	67
Figura 17	Correção de terreno	70
Figura 18	Relação entre geóide, co-geóide, elipsóide e efeito indireto	71
Figura 19	Efeito indireto	72
Figura 20	Tipos e superfícies nodais de harmônicos esféricos	74
Figura 21	Representação gráfica dos harmônicos esféricos do potencial gravitacional terrestre	75
Figura 22	Integração numérica: Regra do Trapézio, Método de Romberg, Regra de Simpson	78

Figura 23	Triângulo esférico básico	89
Figura 24	Princípio da altimetria por radar	96
Figura 25	Cronologia dos satélites altimétricos	97
Figura 26	Medidas de radar altímetro: taxa de solo	98
Figura 27	Relação entre H , h e N	100
Figura 28	Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira do ON	106
Figura 29	Projetos SAGP e SAGS	107
Figura 30	Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira e Rede Gravimétrica Básica no Brasil e no Paraguai	108
Figura 31	Quadrículas de anomalias média de $5' \times 5'$ que possuem informações ..	111
Figura 32	Estações GPS sobre nivelamento no Brasil	113
Figura 33	Rede Altimétrica Brasileira do IBGE	114
Figura 34	Variâncias de grau e erro das variâncias de grau	116
Figura 35	Satélite e conceito da missão CHAMP	119
Figura 36	Conceito da missão GRACE	122
Figura 37	Satélite e conceito da missão GOCE	123
Figura 38	Varição do potencial com a altitude	124
Figura 39	Erro previsto do geóide GOCE	125
Figura 40	Erro do geóide por grau	127
Figura 41	MDT SAM2004_1mv1	129
Figura 42	Fonte das informações do MDT SAM2004_1mv1	130
Figura 43	Comparação GPS/niv com EIGEN-1/119	132
Figura 44	Comparação GPS/niv com EIGEN-GRACE01S/140	133
Figura 45	Comparação GPS/niv com EGM96/180	133
Figura 46	Comparação GPS/niv com EGM96/360	134
Figura 47	Modelo geoidal MAPGEO2004 em SIRGAS2000	135
Figura 48	Modelo geoidal GEOIDE2005 em SIRGAS2000	136

Figura 49	Comparação GPS/niv com o modelo MAPGEO2004	137
Figura 50	Comparação GPS/niv com o modelo GEOIDE2005	137
Figura 51	Comparação GPS/niv com o modelo STOKES2005	138
Figura 52	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $0^\circ \leq \varphi \leq -1^\circ$ e $-51^\circ \leq \lambda \leq -52^\circ$	139
Figura 53	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-7^\circ \leq \varphi \leq -8^\circ$ e $-65^\circ \leq \lambda \leq -66^\circ$	139
Figura 54	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-2^\circ \leq \varphi \leq -3^\circ$ e $-44^\circ \leq \lambda \leq -45^\circ$	140
Figura 55	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-9^\circ \leq \varphi \leq -10^\circ$ e $-40^\circ \leq \lambda \leq -41^\circ$	140
Figura 56	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-12^\circ \leq \varphi \leq -13^\circ$ e $-48^\circ \leq \lambda \leq -49^\circ$	141
Figura 57	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-15^\circ \leq \varphi \leq -16^\circ$ e $-56^\circ \leq \lambda \leq -57^\circ$	141
Figura 58	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-20^\circ \leq \varphi \leq -21^\circ$ e $-51^\circ \leq \lambda \leq -52^\circ$	142
Figura 59	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-22^\circ \leq \varphi \leq -23^\circ$ e $-43^\circ \leq \lambda \leq -44^\circ$	142
Figura 60	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-20^\circ \leq \varphi \leq -21^\circ$ e $-40^\circ \leq \lambda \leq -41^\circ$	143
Figura 61	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-21^\circ \leq \varphi \leq -22^\circ$ e $-45^\circ \leq \lambda \leq -46^\circ$	143
Figura 62	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-22^\circ \leq \varphi \leq -23^\circ$ e $-44^\circ \leq \lambda \leq -45^\circ$	144
Figura 63	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-22^\circ \leq \varphi \leq -23^\circ$ e $-47^\circ \leq \lambda \leq -48^\circ$	144
Figura 64	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-23^\circ \leq \varphi \leq -24^\circ$ e $-46^\circ \leq \lambda \leq -47^\circ$	145
Figura 65	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadrícula $-24^\circ \leq \varphi \leq$	

	-25° e $-49^\circ \leq \lambda \leq -50^\circ$	145
Figura 66	Comparação GPS/niv com o GEOIDE2005 na quadricula $-29^\circ \leq \varphi \leq -30^\circ$ e $-54^\circ \leq \lambda \leq -55^\circ$	146
Figura 67	Pares de estações GPS/niv: erro relativo (área 1)	147
Figura 68	Pares de estações GPS/niv: erro relativo (áreas 2 e 3)	147
Figura 69	Erro relativo do modelo MAPGEO2004	148
Figura 70	Erro relativo do modelo GEOIDE2005	148
Figura 71	Localização das diferenças entre MAPGEO2004 e GEOIDE2005	149
Figura 72	Histograma com a diferença entre MAPGEO2004 e GEOIDE2005	150

Lista de Tabelas

Tabela 1	Tabela de Hammer	66
Tabela 2	Tabela de informações sobre o comportamento do MDT e da CT no Brasil	68
Tabela 3	MDT testados por Matos (2005)	69
Tabela 4	Sumário das missões altimétricas	97
Tabela 5	Informações sobre alguns MGs	117
Tabela 6	Parâmetros das missões	126
Tabela 7	Resumo e requisitos para as missões	127
Tabela 8	Desempenhos previstos do GRACE e GOCE	128
Tabela 9	Estatísticas das comparações dos modelos de geopotencial	134
Tabela 10	Estatísticas dos modelos geoidais	138
Tabela 11	Estatísticas e erro relativo dos modelos geoidais	146
Tabela 12	Estatísticas da diferença entre MAPGEO2004 e GEOIDE2005	150

Lista de Siglas

ACE	<i>Altimeter Corrected Elevations</i>
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
CHAMP	<i>CHALLENGING Mini-satellite Payload</i>
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CMQ	Colocação por mínimos quadrados
CNES	<i>Centre National d'Etude Spatiales</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSR	<i>Center for Space Research</i>
DLR	<i>Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DMA	<i>Defense Mapping Agency</i>
EDC	<i>EROS Data Center</i>
EGM96	<i>Earth Gravitational Model 1996</i>
ENVISAT	Enviromental Satellite
ERS	<i>European Remote Sensing Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FFT-2D	Transformada de Fourier bidimensional
GFZ	<i>GeoForschungsZentrum Potsdam</i>
GLOBE	<i>Global Land One-kilometer Base Elevation</i>
GMT	<i>Generic Mapping Tools</i>
GOCE	<i>Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery And Climate Experiment</i>
GSC	<i>Geological Survey of Canada</i>
GSFC	<i>Goddard Space Flight Center</i>

IAG/USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IAS	<i>Ice Altimetry System</i>
IGSN71	<i>International Gravity Standardization Net 1971</i>
IGeS	<i>International Geoid Services</i>
KBR	<i>K-Band Ranging System</i>
LEPLAC	Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira
MDT	Modelo Digital de Terreno
MG	Modelo de Geopotencial
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NGDC	<i>National Geophysical Data Center</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PVCG	Problema de valor de contorno da Geodésia
RAB	Rede Altimétrica Brasileira
RGB	Rede Gravimétrica Básica do IBGE
RGFB	Rede Gravimétrica Fundamental do Brasil
RN	Referência de nível
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSH	Altitude da superfície do mar <i>Sea surface height</i>
Topex	<i>Topography experiment for ocean circulation</i>
UFAM	Universidade de Manaus

UFPA	Universidade Federal do Pará
UFPI	Universidade Federal do Piauí
UFPe	Universidade Federal de Pernambuco
UFPr	Universidade Federal do Paraná
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
UnB	Universidade de Brasília

Lista de Símbolos

h	Altitude geométrica ou elipsoidal
H	Altitude ortométrica ou normal
N	Ondulação geoidal
v	Volume limitado pela superfície S
F_n	Componente normal de \mathbf{F}
$\text{div}\mathbf{F}$	Divergente do vetor \mathbf{F}
V	Potencial gravitacional da Terra real
W_0	Potencial no nível do mar
U	Potencial normal
Σ	Teluróide
T	Potencial perturbador
ζ	Anomalia de altura
ξ e η	Componentes da deflexão da vertical
E	Elipsóide de referência
R	Raio médio da Terra
γ	Gravidade normal na superfície do elipsóide de referência
ψ	Ângulo geocêntrico entre o ponto de interesse (P) e o ponto utilizado na integração
$S(\psi)$	Núcleo (esférico) da integral de Stokes
α	Ângulo do azimute em torno do ponto de cálculo
g	Gravidade real sobre o geóide
Δg	Anomalia de gravidade
G	Constante universal da gravitação
M	Massa da Terra, incluindo as partes sólida, líquida e gasosa

a	Semi-eixo maior do elipsóide de referência
(r, θ, λ)	Coordenadas polares esféricas do ponto de cálculo
$\delta\bar{C}_{nm}$ e \bar{S}_{nm}	Coefficientes do geopotencial plenamente normalizados de grau n e ordem m
\bar{P}_{nm}	Funções associadas de Legendre plenamente normalizadas
γ_e	Gravidade normal no equador
γ_p	Gravidade normal no pólo
φ	Latitude do ponto
a	Semi-eixo maior do elipsóide
b	Semi-eixo menor do elipsóide
C_{AL}	Correção ar-livre
H_P	Altitude da estação em P
Δg_{AL}	Anomalia de gravidade ar-livre
Δg_H	Anomalia Helmert
C_{BS}	Correção Bouguer simples ou incompleta
ρ	Densidade
Δg_{BC}	Anomalia de Bouguer completa
Δg_{BR}	Anomalia de Bouguer refinada

Sumário

1	INTRODUÇÃO	22
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
2.1	Introdução	25
2.2	Fórmulas de Gauss e identidades de Green	25
2.2.1	Identidades de Green	27
2.2.1.1	Linearização	34
2.3	Problema de Valor de Contorno da Geodésia	37
2.4	Formulação de Stokes	38
2.4.1	Modificações do núcleo da integral de Stokes	44
2.4.1.1	Modificação de Wong e Gore (1969)	46
2.4.1.2	Modificação de Meissl (1971)	48
2.4.1.3	Modificação de Vanicek e Kleusberg (1987)	50
2.4.1.4	Modificação de Featherstone, Evans e Olliver (1998)	52
2.5	Formulação de Molodensky	54
2.6	Reduções e anomalias gravimétricas	54
2.6.1	Anomalia ar-livre	57
2.6.2	Anomalia Helmert	57
2.6.3	Anomalia de Bouguer	58
2.6.4	Anomalia isostática	59
2.6.5	Correção de Terreno	61
2.6.5.1	Correção de Terreno via método de Hammer	64

2.6.5.2	Correção de Terreno via FFT	66
2.6.6	Redução do efeito indireto	69
3	TÉCNICAS MAIS USADAS NA DETERMINAÇÃO DO GEÓIDE	73
3.1	Introdução	73
3.2	Harmônicos esféricos	73
3.3	Integral de Stokes	77
3.3.1	Integração numérica	77
3.3.2	Convolução (FFT)	78
3.3.3	Transformada de Fourier 2D direta e inversa	79
3.3.4	Propriedades da transformada de Fourier 2D	80
3.3.5	Transformada discreta de Fourier 2D	82
3.4	Colocação por mínimos quadrados	84
3.4.1	Função covariância	88
3.5	Ondaletas (<i>Wavelets</i>)	90
3.6	Altimetria por satélite (oceanos)	95
3.7	GPS/nivelamento (pontual)	100
3.8	Combinação	101
4	DADOS UTILIZADOS	104
4.1	Dados de gravidade	104
4.2	Dados GPS sobre nivelamento	111
4.3	Modelo de Geopotencial	113
4.3.1	Novas missões gravimétricas espaciais	118
4.3.2	CHAMP (<i>CHAllenging Minisatellite Payload</i>)	119
4.3.2.1	MG com dados CHAMP	120
4.3.3	GRACE(<i>Gravity Recovery And Climate Experiment</i>)	121

4.3.4	GOCE (<i>Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation</i>)	122
4.3.5	Comparação entre as missões	126
4.4	Modelo Digital de Terreno	128
5	CÁLCULO DO GEÓIDE NO BRASIL	131
5.1	Resultados	134
5.1.1	Erro “absoluto” dos modelos geoidais	137
5.1.2	Erro relativo dos modelos geoidais	146
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	151
	Referências	156

1 INTRODUÇÃO

A revolução provocada pelo *Global Positioning System* (GPS) no posicionamento espacial permitiu a obtenção de altitudes elipsoidais com rapidez e alta precisão. A altitude elipsoidal (h), determinada através da metodologia GPS, pode ser transformada em altitude ortométrica ou normal (H) (quase-geóide, dependendo do sistema de altitudes empregado) utilizando-se a altura geoidal ou quase-geoidal. A precisão da transformação é função da precisão do modelo de separação entre o geóide e o elipsóide. O pleno aproveitamento da tecnologia GPS, na determinação de altitudes ortométricas, exige o constante refinamento da qualidade das informações utilizadas e nas teorias empregadas, assim como métodos mais adequados e rápidos para manipulação de grandes massas de dados, de modo a proporcionar economia de tempo e recursos.

O tema proposto de tese relaciona-se com o problema do valor de contorno de Stokes (Seção 2.4), que é a determinação do geóide por meio de observações de gravidade. O geóide é representado pela superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra que corresponde ao nível médio do mar. Em 1849, Stokes propôs uma fórmula integral que permite a determinação da ondulação geoidal a partir das anomalias de gravidade. Entretanto, a utilização da fórmula de Stokes na Geodésia física possui o inconveniente de necessitar do conhecimento das anomalias de gravidade, reduzidas ao geóide, sobre a Terra para se determinar a ondulação geoidal (N) de um ponto. Tendo em vista a insuficiente distribuição dessas informações, limitava-se a área de integração a uma calota esférica em torno do ponto de cálculo. Porém, essa estratégia gerava erros devido à não consideração dos dados de gravidade localizados na zona externa a essa calota esférica, o chamado “erro de truncamento”. Em 1958, o trabalho pioneiro de Molodensky na modificação da fórmula de Stokes marcou o início das pesquisas para diminuição deste erro. A partir da era espacial, as informações de longos comprimentos de onda do campo gravitacional, derivadas da análise das órbitas dos satélites, foram representadas por meio de modelos de geopotencial, MG (Seção 4.3). Essa nova informação fez crescer o interesse de diversos geodestas pelos estudos de Molodensky na modificação da fórmula de Stokes. Desde

então, os MGs disponíveis têm sido combinados com diferentes tipos de propostas de modificações na fórmula de Stokes para minimizar o erro de truncamento (Seção 2.4.1). Nos cálculos aqui apresentados, foram testados diversos MGs, como o EGM96 e outros modelos que utilizam dados das recentes missões gravimétricas por satélite, em diferentes combinações de grau e ordem.

O esforço dedicado à organização da base de dados de gravidade utilizada nesse trabalho resultou em um conjunto bastante representativo do que foi feito em termos de gravimetria no Brasil (Seção 4.1). A tarefa de identificar as características dos dados existentes e homogeneizá-los torna-se ainda mais necessária quando a região do geóide a ser calculado tem dimensões continentais como no país. Determinados conjuntos de dados utilizados não possuem informações disponíveis sobre sistema de referência, metodologia empregada, instrumental, tipo de altitude e ou o método de redução dos dados. Em função do objetivo do trabalho e da época de seu levantamento, é comum que certos componentes (altitude, coordenadas ou gravidade, por exemplo) tenham sido determinados com menor precisão que outros, provocando erros sistemáticos ou aleatórios. Os levantamentos gravimétricos realizados para fins de exploração geofísica, por exemplo, apesar de numerosos e densos, nem sempre apresentam todas as qualidades exigidas para fins geodésicos. Entretanto, no caso do Brasil, que possui vastas áreas desprovidas de informações gravimétricas, não é conveniente simplesmente ignorar os dados que se encontram nessas regiões por possuírem precisões diferentes. Considerando a cobertura heterogênea desses dados, que apresentam grandes regiões desprovidas de informações de gravidade, optou-se por transformar os dados disponíveis em um modelo gravimétrico digital com resolução de $10' \times 10'$. A utilização de um conjunto de valores médios com distribuição geográfica regular com tal resolução faz com que parte da contribuição de curtos comprimentos de onda seja desprezada. Porém, essa contribuição pode ser calculada utilizando-se os modelos digitais de terreno (MDT).

A aplicação da integral de Stokes pressupõe que os dados de gravidade sejam reduzidos ao geóide. Para isso, é necessária a aplicação do método de condensação de Helmert nas massas topográficas situadas acima dessa superfície (Seção 2.6). Mas, ao deslocar e remover massas topográficas, são produzidas mudanças no potencial de gravidade, gerando erros sistemáticos (efeito indireto) e onde o co-geóide é obtido, ao invés do geóide. Tendo em vista que diferentes reduções geram diferentes co-geóides, o efeito indireto é função do tipo de redução aplicado (Seção 2.6.6).

Foi dada especial atenção às correções de terreno (Seção 2.6.5), objetivando re-

mover a alta correlação entre as anomalias de gravidade ar-livre e a topografia, e evitar a suavização resultante da utilização de estações gravimétricas, que são sistematicamente observadas em níveis diferentes do topográfico médio da quadrícula. Tal remoção é essencial, considerando que as observações gravimétricas, em sua maioria, foram determinadas ao longo de estradas ou vales, não sendo representativas do terreno no caso de áreas montanhosas. Procurou-se, também, explorar a baixa correlação existente entre as anomalias de gravidade Bouguer com esta mesma topografia.

Entre as técnicas mais usadas para a determinação do geóide (Capítulo 3), foram testadas a integração numérica e a FFT para a avaliação da integral modificada de Stokes, por meio do esquema "remover-calcular-repor" (Capítulo 5).

Para gerar o modelo digital de altitudes médias aqui empregado, foi utilizado o MDT SAM2004_1mv1, de $1' \times 1'$, desenvolvido por Matos (2005) após uma criteriosa avaliação e comparação com os MDTs globais existentes, referências de nível (RN) e informações de cartas topográficas e batimétricas digitalizadas (Seção 4.4). O modelo reúne dados do SRTM na parte terrestre e, onde esse não possuía informações, foi completado com o DTM2002. Na parte oceânica, utilizou informações de cartas náuticas, folhas de bordo e batimetria. O mesmo SAM2004_1mv1 serviu de base para os cálculos de correção de terreno (Seção 2.6.5) e efeito indireto (Seção 2.6.6).

Para avaliar os modelos geoidais calculados, foram utilizadas as ondulações geoidais resultantes da diferença entre as altitudes elipsoidais e ortométricas (Seção 3.7), provenientes das estações geodésicas do IBGE e de outras instituições que foram levantadas por GPS e nivelamento geométrico (Seção 4.2).

Os procedimentos de cálculo e os resultados numéricos dos modelos testados, assim como a avaliação dos mesmos a partir da comparação com as ondulações diretamente resultantes da diferença entre a altitude GPS e de referências de nível da Rede Altimétrica Brasileira são aqui apresentados (Capítulo 5). Estes mesmos resultados são comparados entre si e são feitas ponderações. Espera-se que os dados que serão disponibilizados pelas novas missões espaciais gravimétricas (Seção 4.3.1) proporcionem MGs cada vez mais homogêneos e precisos, permitindo que o refinamento no cálculo de modelos geoidais acompanhe esses progressos. Enfim, acredita-se que os dados forneçam à Geodésia inéditos e estimulantes desafios, que são ansiosamente aguardados.