

DETERMINAÇÃO DE UM MODELO GEOIDAL LOCAL PARA O MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE

Eng. Cartógrafo Daniel Goldani ¹
Prof. Dr. Francisco Humberto Simões Magro ²
Eng. Cartógrafo Rafael Santos Genro ¹
Eng. Cartógrafo Rodrigo Salomoni ³

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – goldani@ufpr.br ; rafasage@ufpr.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Departamento de Geodésia – Fax: 555133167302, francisco.magro@ufrgs.br

³ SPG - Soluções em Posicionamento Global, Porto Alegre, RS, Brasil, salomoni@spg.com.br

RESUMO

Por definição, a **Altitude ortométrica** (H) de um ponto na superfície terrestre é a distância, contada ao longo da vertical, entre este ponto e o geóide. Pode ser obtida através de nivelamento geométrico de precisão associado à Gravimetria ou ainda, mais modernamente, através de nivelamento com GPS em regiões, nas quais tem-se um modelo geoidal local determinado, o qual exprima o comportamento da ondulação geoidal para a região.

Este trabalho teve como objetivo criar um modelo geoidal local para o Município de Porto Alegre, com o qual, futuramente, os usuários de GPS possam transformar as altitudes geométricas fornecidas pelo GPS em altitudes ortométricas, as quais são usualmente utilizadas em diversas aplicações de engenharia, devido ao fato de serem dotadas de significado físico e não puramente geométrico.

Palavras-Chave: Geóide; Altitude Ortométrica; Nivelamento com GPS.

DETERMINATION OF A LOCAL GEOID MODEL FOR THE CITY OF PORTO ALEGRE, RS, BRAZIL

ABSTRACT

*By definition, the **Orthometric Height** (H) of a point in the terrestrial surface is the distance, counted along the vertical, between this point and the geoid. It can be obtained through geometric leveling of precision associated Gravimetry or still, nowadays, through leveling with GPS in areas, in which there is a local geoidal model, which it expresses the behavior of the undulation for the area.*

This work has as objective creates a local geoidal model for the district of Porto Alegre, with which, hereafter, the users of GPS can transform the geometric height supplied by GPS in orthometric height, which they are used usually in several engineering applications, due to the fact of they be endowed with physical meaning and not purely geometric.

Keywords: Geoid; Orthometric Height; GPS leveling.

1. INTRODUÇÃO

A altitude oficialmente adotada no Brasil é a ortométrica (H), a qual quantifica a separação, medida ao longo da vertical, entre a superfície física terrestre e uma dada superfície de referência, definida pelo prolongamento médio dos oceanos em repouso se prolongando através dos continentes ou ainda, mais rigorosamente, uma superfície equipotencial particular do campo da gravidade e aproximadamente coincidente com o nível médio dos oceanos, sendo esta utilizada como superfície de referência para a altitude ortométrica. Tal superfície, contínua e convexa em toda a sua extensão e denominada Geóide, define a forma aproximada da Terra. (PESSOA, 1996)

A ligação da altitude ortométrica com a realidade física dá-se através do campo de gravidade, implicitamente incluído na definição, quando se refere ao nível médio dos oceanos, potencial do campo da gravidade e à vertical. Sua importância prática está no fato de que os fenômenos naturais têm

comportamento regido por leis físicas tais como a atração gravitacional. A altitude ortométrica trata-se portanto, de uma grandeza dotada de significado físico. Desta forma, é que são definidas as altitudes dos marcos geodésicos, implantados pelo IBGE em todo o território brasileiro.

Historicamente, por questões de ordem operacional, a altitude tem sido obtida e tratada independentemente das outras coordenadas φ e λ , respectivamente latitude e longitude geodésicas. A Geodésia Celeste suplantou em grande parte esta dificuldade operacional, proporcionando como resultado o vetor $[\varphi, \lambda, h]^T$, onde h é a altitude referida a um dado elipsóide. Diferentemente da altitude ortométrica, a “terceira coordenada” fornecida pelo GPS tem caráter puramente geométrico. A separação entre a superfície física da Terra e o elipsóide, medida ao longo da normal, denomina-se altitude elipsoidal ou geométrica. Trata-se de uma grandeza que não se liga diretamente ao campo de gravidade e que tem como superfície de referência um elipsóide de revolução, figura adequada à geometrização da Terra.

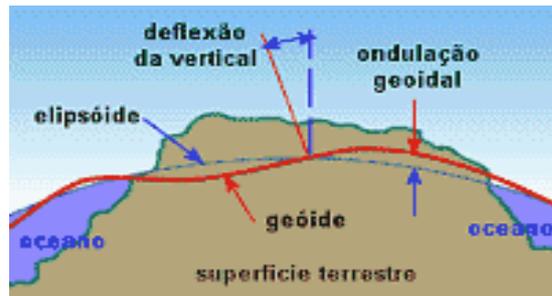


Figura 1 – Superfícies Terrestre, Geóide, Elipsóide, deflexão ou desvio da vertical e ondulação geoidal

O usuário GPS obtém, em tempo real ou por pós-processamento, a altitude geométrica h referida ao World Geodetic System-1984 (WGS-84). A este sistema também estão referidas as demais coordenadas geodésicas φ e λ . A transformação a ser procedida relacionando h e H é matematicamente simples, pois envolve unicamente uma mudança da referência elipsoidal para a referência geoidal. Assume-se, para efeitos práticos que, num mesmo ponto, a vertical (reta perpendicular à superfície do geóide) e a normal (reta perpendicular à superfície do elipsóide) coincidem (desvio da vertical nulo), resultando a expressão:

$$H = h - N \quad (1)$$

onde:

H = Altitude Ortométrica

h = Altitude Geométrica

N = Ondulação Geoidal

O termo N representa a separação, naquele ponto, entre o geóide e o elipsóide. A esta grandeza dá-se o nome de ondulação geoidal ou altura geoidal. Convenciona-se que N sempre será positivo quando o geóide situar-se acima do elipsóide e negativo na situação inversa (figura 2).

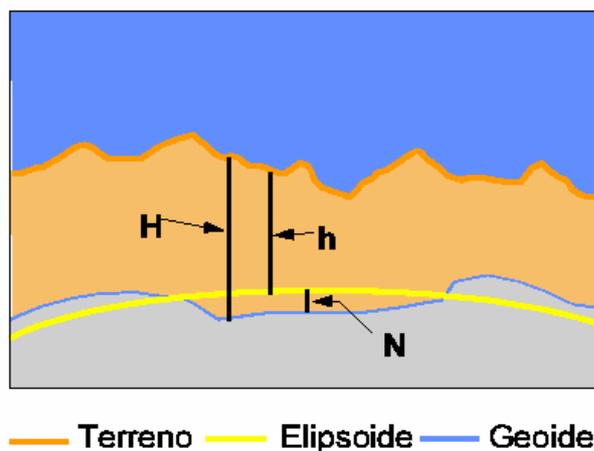


Figura 2 (Ondulação Geoidal negativa) – Definição geométrica para a expressão (1)

Uma solução alternativa para a elaboração do mapa geoidal de uma determinada região é o modelamento local do geóide, baseado no rastreamento de satélites do GPS sobre referências de nível. A condição básica para esta determinação é que os pontos estejam ligados a um mesmo datum vertical e portanto, possuam altitudes ortométricas conhecidas (H). O rastreamento proporcionará um terno de coordenadas $[\varphi, \lambda, h]^T$. Desta forma, a aplicação da expressão (1) permitirá obter as diferenças entre as altitudes elipsoidais (geométricas) e as altitudes ortométricas.

O presente trabalho foi realizado no Município de Porto Alegre. Neste existe uma rede altimétrica composta com várias Referências de Nível (RRNN) com altitudes ortométricas conhecidas, entre as quais, algumas tiveram suas posições determinadas com a tecnologia GPS. Conseqüentemente, este levantamento propiciou as coordenadas definidas pelo terno $[\varphi, \lambda, h]^T$. O conhecimento das altitudes num mesmo ponto, uma medida e a outra conhecida, permite determinar a ondulação geoidal com a utilização da expressão (1). Procedendo de tal forma em diferentes pontos de uma mesma região, poder-se-á fazer o modelamento local do geóide. Tais RRNN estão vinculadas à Rede Altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), cuja origem vertical vem a ser o Datum de Imbituba, definido pela estação maregráfica do porto da cidade de mesmo nome, no Estado de Santa Catarina.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 Materiais Utilizados e Procedimentos Metodológicos

2.1.1 Materiais Utilizados

Para a execução deste projeto foram necessários os seguintes materiais:

- 1) um veículo para transportar os integrantes do projeto e equipamentos geodésicos durante os meses de julho e agosto de 2002 aos sábados (meio turno, parte da tarde) e aos domingos (turno integral);
- 2) 2 receptores GPS geodésicos L1 (fabricante Techgeo), modelos GTR1 e GTRA;
- 3) 1 receptor GPS de Navegação (Garmin), modelo Etrex Summit
- 4) 2 Bastões de 2 metros (fabricante AVR) fixos com nível de bolha esférica, para GPS;
- 5) 1 Bipé (fabricante AVR) para bastão de 2 metros;
- 6) 1 Base nivelante com bolha esférica, prumo óptico e três parafusos calantes;
- 7) 1 nível automático (fabricante Topcon) modelo ATG6 com precisão de 2mm\km, compensador magnético, aumento de 26 vezes com leitura direta
- 8) 1 mira graduada extensível, cujo comprimento é de 4 metros.
- 9) 2 tripés;
- 10) 2 Trenas;
- 11) 2 pranchetas;
- 12) 1 Cone de sinalização;
- 13) Pincel e Tinta;
- 14) 1 Marreta e pregos de aço de cabeça larga.

2.1.2 Procedimentos Metodológicos

O Projeto seguiu a seguinte metodologia:

- 1) Planejamento do Projeto: Levantamento bibliográfico junto à Biblioteca Setorial do Instituto de Geociências da UFRGS e à bibliotecas virtuais na Internet;
- 2) Coleta de dados relativos à localização das Referências de Nível do Município: Solicitação das informações da rede altimétrica do Município de Porto Alegre junto à Secretaria de Planejamento Municipal;
- 3) Elaboração das rotas para execução do levantamento: Planejamento das diferentes etapas do projeto, incluindo tanto a escolha das RRNN a serem observadas pela constelação de satélites do GPS, quanto a melhor trajetória para o deslocamento até as mesmas;
- 4) Levantamento de recursos para execução do projeto: Encaminhamento do relatório contendo intenção de projeto, cronogramas físico e financeiro para o Instituto de Geociências, responsável pelo financiamento do projeto;
- 5) Execução do Levantamento: Levantamento no Município de Porto Alegre com reconhecimento das RRNN e posicionamento geodésico nas RRNN com a utilização da tecnologia de GPS;
- 6) Processamento dos dados e avaliação dos resultados: Processamento e análise dos dados observados;
- 7) Ações Corretivas: Providências tomadas pela equipe responsável, caso houvesse erros de caráter grosseiro, acidental ou sistemático ocorridos durante execução do levantamento, a fim de não comprometer os resultados do projeto previamente estabelecidos;

8) Elaboração do Mapa Geoidal de POA: Modelamento do Geóide do Município de Porto Alegre, a ser representado num mapa contendo a base cartográfica de Porto Alegre, que represente numa escala adequada as isolinhas contendo isovalores das ondulações do Geóide no Município de Porto Alegre;

9) Desenvolvimento do Software: Criação de um software, cuja função seja interpolar ondulações do Geóide no Município de Porto Alegre;

10) Elaboração da Monografia; Confeção do relatório do Projeto de Pesquisa, contendo tema, objetivos geral e específico, objeto de pesquisa, hipóteses, metodologia, enfoques teóricos, referências bibliográficas.

2.2 Área De Trabalho

2.2.1 Descrição Da Área

O trabalho foi realizado no Município de Porto Alegre, o qual localiza-se entre os paralelos de 29°57' e 30°16' Sul e os meridianos 51°16' e 51°02' à Oeste de Greenwich com uma forma de aproximadamente 30 km de Norte a Sul e de 15 km no sentido Leste-Oeste. Possui espaços de planícies, mas está circundado por 40 morros que abrangem 65% da área limitada por uma orla fluvial de 72km. Ocupa uma área de total de 476,30 km², dos quais 431,85 km² são da área continental e 44,45 km² da região insular. O Município apresenta seu ponto culminante no Morro Santana, onde um vértice geodésico de 3ª ordem apresenta uma altitude ortométrica de 311,20m e os pontos mais baixos encontram-se na área continental, no Aeroporto Salgado Filho com 1,1 m e na área insular, mais concretamente na Ilha das Flores a Foz do Arroio Feijó com a altitude ortométrica de 0,1m.

2.2.2 Rede Altimétrica

A Secretaria de Planejamento Municipal apresenta em seu banco de dados cadastral uma rede altimétrica cujas referências de nível estão referidas ao Datum Vertical de Imbituba e apresenta mais de 400 Referências de Nível medidas por meio de nivelamento geométrico. É uma rede de primeira ordem. Essa rede altimétrica começou a ser implementada em 13 de outubro de 1945, sendo concluída no início dos anos 80.

2.2.3 Quadrantes de Densificação com RRNN Rastreadas com GPS

Quanto ao critério utilizado para a escolha das Referências de Nível a serem rastreadas, primeiramente analisou-se a distribuição de tais pontos no território do Município de Porto Alegre. Posteriormente, após a confecção de uma malha de coordenadas geodésicas para a região, cuja resolução estipulada foi de 1,5 minutos de arco ou aproximadamente 2700 metros, criou-se os aqui denominados “quadrantes de densificação”, dos quais 1 RN foi eleita para ser observada por GPS. (*vide anexo 5.6*)

Tal criação surgiu a partir da idéia de construir um mapa geoidal para a região mais densificado do que um dos então disponíveis, o EGM-96, cuja resolução vem a ser 15 minutos de arco.

O critério preponderante utilizado para tal escolha foi de que, num quadrante de densificação, existindo uma série de RRNN, procurou-se selecionar aquela que mais se aproximasse posicionalmente do centróide do quadrante, procurando manter assim, aproximadamente equivalente a distância entre si dos pontos escolhidos. Porém, devido à escassez ou inexistência de RRNN em algumas regiões da cidade, não foi possível preencher alguns quadrantes de densificação com pontos a serem rastreados com GPS.

2.3 Planejamento e Resultados Encontrados

2.3.1 Planejamento

No planejamento de levantamentos utilizando GPS, tal como em qualquer método convencional, é essencial ter à disposição a documentação cartográfica mais recente da região de trabalho, com a qual não somente é possível definir quais pontos serão levantados, como também analisar os melhores trajetos viários a fim de chegar aos pontos definidos para consolidar tal levantamento.

Os pontos selecionados para rastreio foram referências de nível pertencentes à rede altimétrica do município, cujas altitudes ortométricas foram determinadas por nivelamento geométrico de precisão na época de sua implantação. Para localizá-los, utilizou-se as fichas de memorial descritivo dos pontos cedidos pela Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos (Órgão responsável pelo estabelecimento e conservação das RRNN em Porto Alegre), inerente à Secretaria de Planejamento Municipal (SPM).

2.3.1.1 Cronograma Físico

O Cronograma físico das diferentes atividades segue o que consta no quadro 7.

Quadro 1 – Cronograma Físico

Descrição da Atividade	JUN/02				JUL/02				AGO/02				SET/02				OUT/02			
	Semana				Semana				Semana				Semana				Semana			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 – Planejamento do Projeto																				
2 – Coleta de dados relativos à localização das Referências de Nível do Município																				
3 – Elaboração das rotas para execução do levantamento																				
4 – Levantamento de recursos para execução do projeto																				
5 – Execução do levantamento																				
6 – Processamento dos dados e avaliação dos resultados																				
7 – Ações Corretivas																				
8 – Elaboração do Mapa Geoidal de POA																				
9 – Desenvolvimento do Software																				
10 – Elaboração da Monografia																				
11 – Defesa da Monografia																				

2.3.2 Levantamento de Campo

O método de posicionamento utilizado neste trabalho foi o relativo, no módulo estático. Utilizaram-se três estações de rastreamento contínuo como referencial (base):

- Estação RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do IBGE, sendo esta a principal estação; (*vide anexo 5.1*)
- Estação RIBAC (Rede INCRA de Bases Comunitárias) do INCRA; (*vide anexo 5.2*)
- Estação SPG, pertencente à empresa privada Soluções em Posicionamento Global. (*vide anexo 5.3*)

Todas estas estações foram processadas entre si, a partir da informação posicional oficial da estação RBMC. (*vide anexos 5.2 e 5.3*)

Os receptores GPS utilizados na ocupação das estações (RRNN) foram o GTR1 e o GTRA, ambos de uma frequência, fabricados pela TechGeo.

Partindo-se de averiguações empíricas realizadas pela equipe utilizando os receptores supracitados, observou-se que o processador (software EZSURV versão 2.06) geralmente fornecia uma solução do tipo “fixed” com segurança em ocupações estáticas que haviam sido rastreadas aproximadamente a partir de 60 minutos, em linhas-base inferiores a 10km. Adicionalmente, detectou-se a ínfima melhoria do erro médio quadrático das coordenadas, ou variação de posição de um ponto, comparando-se o fato do mesmo ser ora rastreado durante apenas o tempo necessário para tornar seu processamento “fixed”, ora rastreado durante um período acima de tal tempo mencionado.

Logo, o tempo de ocupação em cada estação foi definido empiricamente, levando em consideração a distância entre os pontos rastreados e as estações base, geralmente permanecendo em torno de 40 a 70 minutos nos mais próximos (distâncias menores que 10km), e, preferencialmente, de 70 a 90 minutos nos mais distantes (distâncias maiores que 10km). Adotou-se 5 segundos para taxa de coleta de observações e 15 graus para máscara de elevação.

Em alguns pontos onde era possível ocorrer obstrução do sinal do satélite, tal como embaixo de árvores, RRNN estabelecidas tanto em paredes de construções, quanto nas proximidades das mesmas, foi necessário a realização de nivelamento geométrico para um ponto excêntrico.

Utilizou-se para esta tarefa um 1 nível automático (fabricante Topcon) modelo ATG6 com precisão de 2mm/km, compensador magnético e aumento de 26 vezes com leitura direta. Através de um lance de nivelamento, a altitude ortométrica do ponto (Referência de Nível) foi transportada para outro onde não ocorresse obstrução do sinal dos satélites. Para esta tarefa de nivelamento, tomou-se o cuidado de instalar o nível num ponto, de maneira que o mesmo estivesse equidistante a sua ré e a sua vante, a fim de neutralizar a influência da curvatura terrestre e da refração.

2.3.3 Processamento de Dados

Para a realização do processamento dos dados, utilizaram-se os softwares EZSURV versão 2.06 (desenvolvido pela Empresa canadense Viasat e distribuído juntamente com os equipamentos da TechGeo) e o Util versão 1.60 (desenvolvido pela Empresa brasileira TechGeo). Este último serviu para descarga dos dados dos receptores e eventualmente conversão para o formato RINEX (Receiver INdependent EXchange format). Também foi utilizado nas tarefas de conversão de dados o software Pathfinder Office, pois os dados da RIBAC não estavam sendo oferecidos formatados em RINEX na ocasião em que foi realizado este trabalho.

Dentro do software EZSURV, o módulo responsável pelo processamento geodésico de dados chama-se Post Processor. Este módulo permite a carga das observações brutas e sua análise no tempo. É necessário que se faça a configuração adequada de cada ocupação estática. Dados coletados em campo, como altura de antena e o nome das estações, devem ser cuidadosamente inseridos no módulo Post Processor.

As ocupações estáticas referentes às estações-base foram criteriosamente nomeadas conforme a data do rastreamento e a instituição responsável pelas mesmas, permitindo assim, um nível de controle de processamento muito bom. Haja visto que para cada ocupação correspondente à RN existiam três estações-base operando simultaneamente, o volume de dados a ser processado foi 3 vezes maior, comparado às condições normais de processamento (1 estação base e uma ocupação estática a ser determinada).

Concluído o processamento dos dados, o número de linhas-base ultrapassou 180, resultando em mais de 60 pontos determinados com resultados declarados em relatórios de processamento individuais para cada combinação de ocupação estática e estação-base. (*vide anexo 5.5*)

No software EZSURV são possíveis apenas três tipos de solução: (FIXED, FLOAT ou PSEUDORANGE), sendo as duas primeiras resultado do processamento da dupla diferença de fase e a outra apenas pseudo-distância. O software decide internamente entre FIXED e FLOAT, tomando decisão do mais provável através da análise da variância obtida à posteriori.

2.3.4 Correções de Dados coletados em Campo

Tendo em vista a exclusão de dois pontos (RN 244 e RN 415), devido a erros de caráter grosseiro, sistemático ou acidental envolvendo a obtenção da altitude ortométrica do mesmo, resultando um valor de ondulação geoidal significativamente diferente dos demais para a região, (*vide anexo 5.4*) o Modelo Geoidal de Porto Alegre, foi gerado a partir de 60 ondulações geoidais observadas. (*vide anexo 5.6*)

As Referências de Nível são geralmente materializadas a partir de blocos de concreto, sobre os quais uma peça de bronze é chumbada, indicando data e instituição responsável referentes a sua implantação. (*vide anexo 5.10*)

Das 60 RRNN utilizadas no processo de geração do modelo geoidal, 6 não possuíam a peça de bronze mencionada (RN 39, RN 92, RN 146, RN 255, RN 271, RN 309).

Segundo a Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos (Órgão responsável pelo estabelecimento e conservação das RRNN em Porto Alegre), a espessura da peça de bronze da RN é de 1cm, gerando assim, a necessidade de corrigir em tal ordem o desnível medido.

Conseqüentemente, corrigiu-se o valor do desnível, utilizado para transporte da altitude ortométrica destas RRNN até o seus respectivos pontos de rastreamento com GPS. A correção foi de **(1 centímetro negativo)** sobre o valor do desnível medido nestes pontos, não apenas considerando o módulo, mas também o sinal do mesmo.

Ou seja:

Para desníveis negativos:

$$DN_{\text{corrigido}} = DN_{\text{medido}} - 0,01\text{m}; \text{ onde } DN_{\text{medido}} < 0 \quad (2)$$

Para desníveis positivos:

$$DN_{\text{corrigido}} = DN_{\text{medido}} - 0,01\text{m}; \text{ onde } DN_{\text{medido}} > 0 \quad (3)$$

O valor da altura da antena do GPS extraída em campo, resultante do intervalo métrico vertical averiguado entre a superfície terrestre e a referência da antena, foi utilizado durante o processamento de dados no software EZSURV. Porém, sendo 26 milímetros a diferença entre a referência da antena e seu centro de fase, tal constante foi incluída posteriormente, corrigindo-se assim, a altitude geométrica fornecida pelo GPS.

Tal procedimento foi utilizado visando facilitar a conferência dos valores de altura de antena inseridos no software com relação às planilhas de campo.

Logo, a fórmula usada para a correção das altitudes geométricas foi:

$$h_{\text{GPS corrigido}} = h_{\text{GPS medido}} - 0,026\text{m} \quad (4)$$

2.3.5 Criação do Modelo Geoidal

O modelo geoidal (denominado a partir de então como GEOIDEPOA) foi gerado através das observações de ondulação geoidal consideradas válidas (60 valores de ondulação geoidal). A ondulação geoidal no presente caso é resultado da fórmula:

$$N_i = h_i - H_i \quad (5)$$

Onde:

N_i = Ondulação Geoidal no ponto "i" rastreado por GPS;

h_i = Altitude Geométrica do ponto "i" rastreado, fornecida pelo processamento das observações GPS;

H_i = Altitude Ortométrica do ponto "i" rastreado por GPS, obtida através do transporte da Altitude Ortométrica da RN mais próxima até o ponto referido via nivelamento geométrico.

As coordenadas selecionadas obtidas no processamento, expressas na projeção UTM sob o Datum SAD69BR, juntamente com as respectivas ondulações geoidais foram agrupadas em uma lista, que foi utilizada como dado de entrada para a geração do mapa geoidal. O software adotado para a elaboração do mapa geoidal foi o Surfer, versão 8 (versão demonstrativa, disponível em <http://www.goldensoftware.com> em setembro de 2002).

Os passos seguidos para a elaboração do modelo a partir dos resultados de ondulação observada foram os seguintes:

- formatação dos resultados (Colunas Este Norte Ondulação);
- geração do *Grid (Gridding)* via "Krigagem".

2.3.5.1 Resultados do Gridding

O resultado do Gridding é uma matriz regular de 38 colunas por 41 linhas, cujos nós ocorrem a cada 550 metros em Este e a cada 700 metros em Norte. A escolha desta resolução (linhas x colunas) se deu em função da extensão no sentido norte-sul do município e da necessidade de cobertura de lacunas existentes no município em zonas onde não foi possível atingir a meta de densificação de pontos. O resultado pode ser visto no *anexo 5.6*, sob a forma de mapa de isocurvas.

2.3.5.2 Interpolador sobre o modelo

Foi desenvolvido um programa de interpolação sobre o modelo resultante capaz de permitir ao usuário o conhecimento do valor da ondulação geoidal em qualquer posição no interior da região de estudo. O programa, que opera pelo método do vizinho mais próximo, recebeu o nome de POAGINT, que tem o significado de Interpolador Geoidal no município de Porto Alegre. Este interpolador necessita do arquivo SUPDAT.DXT disponível no mesmo diretório de execução, sendo este arquivo composto pelas ondulações geoidais interpoladas na Krigagem em cada nó da matriz 38x41 elementos e suas respectivas coordenadas.

2.3.5.3 Funcionamento do interpolador

O interpolador desenvolvido opera conforme os passos a seguir:

- a) Leitura do arquivo SUPDAT.DXT e avaliação dos limites mínimos e máximos (Este, Norte e Ondulação) em todo o arquivo, perfazendo um total de 1558 coordenadas, ou 38x41 elementos;
- b) Carga de todos os valores de Este em uma matriz com 1558 elementos;
- c) Carga de todos os valores de Norte em uma matriz com 1558 elementos;
- d) Carga de todos os valores de Ondulação em uma matriz com 1558 elementos;
- e) Pergunta ao usuário as coordenadas do ponto cuja ondulação necessita saber;
- f) Busca dos 4 vizinhos mais próximos ao ponto fornecido;
- g) Se identificados os vizinhos, o programa calcula as distâncias do ponto fornecido para cada um dos seus 4 vizinhos, caso contrário, informa ao usuário que a coordenada fornecida está fora dos limites do interpolador.
- h) Usando o inverso das distâncias como peso, o interpolador calcula a média ponderada das 4 ondulações vizinhas e fornece então o valor da ondulação no ponto fornecido.

2.3.5.4 Código do programa interpolador

O código fonte do programa de interpolação é de propriedade da Empresa SPG – Soluções em Posicionamento Global LTDA, que forneceu subsídios ao desenvolvimento do algoritmo. Uma versão executável do programa encontra-se disponível no seguinte endereço:

http://www.spg.com.br/ftp/gps_files/geoidepoa/interpolador.zip (setembro de 2002)

2.3.6 Análise dos Resultados - Controle de Resultados

O método utilizado para verificar a qualidade do interpolador gerado referente ao modelo geoidal local para a região de Porto Alegre seguiu os seguintes passos:

1º) Passo: Do total de 60 pontos observados via GPS, cuja ondulação geoidal pontual tornou-se conhecida, foram escolhidos aleatoriamente 6 pontos em três sorteios distintos, com os quais testou-se o interpolador do modelo geoidal gerado com os pontos restantes;

2º) Passo: Gerou-se o modelo geoidal com os 54 pontos restantes (modelo depreciado);

3º) Passo: Comparou-se as ondulações geoidais dos 6 pontos medidas em campo com as fornecidas pelo interpolador;

4º) Passo: Testou-se com distribuição normal as 2 ondulações de cada ponto da seguinte forma:

Ho: $N_{i \text{ interpolador}} = N_{i \text{ obs.campo}}$

H1: $N_{i \text{ interpolador}} \neq N_{i \text{ obs.campo}}$

Nível de significância 5%, teste bilateral;

5º) Passo: Calculou-se o valor médio dos módulos dos Resíduos (diferenças), assim como o erro médio quadrático da média.

SORTEIO 1:

RN sorteada	Este	Norte	$N_{\text{obs.campo}}$ [m]	$N_{\text{interpolador}}$ [m]	Resíduo _i ($N_{\text{obs.campo}} - N_{\text{interpolador}}$) [mm]	Módulo do Resíduo _i ($N_{\text{obs.campo}} - N_{\text{interpolador}}$) [mm]	(Média resíduos - resíduo _i) ²
RN 259	480700,420	6678502,655	2,437	2,453	-16	16	462,25
RN 119	492894,699	6656314,849	2,579	2,557	22	22	240,25
RN 038	485077,790	6669005,036	2,568	2,569	-01	01	1332,25
RN 308	483416,941	6669467,433	2,59	2,611	-21	21	272,25
RN 113	491230,529	6657898,545	2,457	2,591	-134	134	9312,25
RN 242	487966,525	6682375,930	2,383	2,352	31	31	42,25
					Média resíduos	37,50	
					Desvio Padrão média dos resíduos	48,29	
					Erro Médio Quadrático da Média		19,72 mm

SORTEIO 2:

RN sorteada	Este	Norte	N _{obs.campo} [m]	N _{interpolador} [m]	Resíduo _i (N _{obs.campo} – N _{interpolador}) [mm]	Módulo do Resíduo _i (N _{obs.campo} – N _{interpolador}) [mm]	(Média _{resíduos} – resíduo _i) ²
RN312	482206,736	6674303,202	2,488	2,518	-30	30	210,25
RN284	482147,608	6677277,095	2,466	2,468	-02	02	1806,25
RN076	476231,945	6672421,551	2,437	2,495	-58	58	182,25
RN039	486746,239	6664139,249	2,562	2,600	-38	38	42,25
RN332	482027,483	6680613,363	2,426	2,424	02	02	1806,25
RN029	478919,839	6663756,995	2,807	2,670	137	137	8556,25
					Média _{resíduos}	44,50	
					Desvio Padrão _{média dos resíduos}	50,21	
					Erro Médio Quadrático da Média		20,50mm

SORTEIO 3:

RN sorteada	Este	Norte	N _{obs.campo} [m]	N _{interpolador} [m]	Resíduo _i (N _{obs.campo} – N _{interpolador}) [mm]	Módulo do Resíduo _i (N _{obs.campo} – N _{interpolador}) [mm]	(Média _{resíduos} – resíduo _i) ²
RN043	484855,477	6667966,100	2,541	2,559	-18	18	1573,44
RN119	492894,699	6656314,849	2,579	2,476	103	103	2055,11
RN255	481095,589	6667948,145	2,560	2,588	-28	28	880,11
RN102	492339,668	6663094,165	2,607	2,498	109	109	2635,11
RN308	483416,941	6669467,433	2,59	2,612	-22	22	1272,11
RN092	484707,069	6660300,665	2,584	2,650	-66	66	69,44
					Média _{resíduos}	57,67	
					Desvio Padrão _{média dos resíduos}	41,20	
					Erro Médio Quadrático da Média		16,82mm

De acordo com os três sorteios realizados, concluiu-se que o interpolador depreciado (por ser composto de 54 pontos e não de 60 pontos do modelo definitivo) é capaz de fornecer ondulações geoidais com uma precisão de 20,50mm na pior das hipóteses. Convém ressaltar que o máximo resíduo encontrado foi de 137mm, comprovando-se a importância do ponto gerador deste resíduo no modelo.

2.3.6.1 Precisão da rede altimétrica de Porto Alegre

Por falta de informações mais completas, considerou-se que Porto Alegre está com sua rede altimétrica categorizada como rede para fins topográficos, ou seja, dentro das especificações da resolução PR 22, de 21 de julho de 1983. Pela norma de nivelamento, a rede deve sempre ter o

comprimento de suas linhas inferiores a 3km (desejável) , considerando-se o nivelamento em uma direção apenas. Verificou-se que em Porto Alegre esta condição se satisfaz para a maior parte do município urbanizado.

Sabe-se que a rede altimétrica de Porto Alegre não sofreu um ajustamento global de suas altitudes. A rede foi ajustada em circuitos pequenos, de forma isolada, dando uma garantia, na pior das hipóteses, de uma precisão interna expressa pela fórmula (6), de acordo com as normas da PR 22/1983.

$$\text{Precisão Interna da Rede Altimétrica de POA} = [12\text{mm} \cdot (k)^{1/2}] \quad (6)$$

Onde:

k = Comprimento das linhas de nivelamento expresso em quilômetros.

Então, adotando-se a precisão da rede altimétrica sem o ajustamento global $[12\text{mm} \cdot (k)^{1/2}]$, tem-se uma precisão de **12,42mm**, sendo esta a precisão de cada ponto da rede.

Chegou-se neste valor da seguinte maneira:

Área do município: 476,30km²

Número de total de RRNN: 415

Dividindo $476,30/415 = 1,147 \text{ km}^2 / \text{RN}$

Linearizando: $\text{RAIZ}(1,147) = 1,071$ é a distância média entre RRNN.

k é igual a 1,071 (comprimento da linha em km, conforme a PR 22);

Precisão Interna da Rede Altimétrica de POA = $[12\text{mm} \cdot (k)^{1/2}] = [12\text{mm} \cdot (1,071)^{1/2}] = 12,42\text{mm}$

2.3.6.2 Precisão do Modelo Geoidal Local (GeoidePOA)

Para o cálculo da precisão do modelo geoidal, foi considerado o resultado acima, de 12,42mm para a precisão de toda rede altimétrica do Município, e a precisão de cada altitude geométrica determinada no processamento das observações GPS, segundo a teoria de propagação de erros aleatórios, para cada ponto de ondulação observada.

A precisão_h foi obtida através da análise de todas as precisões de posicionamento altimétrico, considerando-se a média ponderada pelo inverso da distância das soluções de cada uma das três estações base (quando possível), e em caso de uma ou de duas soluções serem do tipo “float”, usou-se as que fossem fixas para a ponderação (*Vide anexo 5.4*)

$$\text{Precisão do Modelo} = \text{máximo valor de } [(\text{precisão}_H)^2 + (\text{precisão}_h)^2]^{1/2} \quad (7)$$

Onde:

Precisão do Modelo = Precisão do Modelo Geoidal GEOIDEPOA

precisão_H = Erro Médio Quadrático das Altitudes Ortométricas da rede Altimétrica

precisão_h = Erro Médio Quadrático do valor das Altitudes Geométricas extraídas dos Processamentos de observações GPS, para cada posição altimétrica observada.

$$\begin{aligned} \text{Precisão do Modelo} &= \text{máximo valor de } [(12,42\text{mm})^2 + (\text{precisão}_h)^2]^{1/2} \\ &= \mathbf{44,47\text{mm}} \quad (\text{vide anexo 5.4}) \end{aligned}$$

3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os conceitos apresentados, as metodologias utilizadas e os resultados alcançados e aqui discutidos para a construção de um modelo geoidal no Município de Porto Alegre levam às seguintes conclusões:

1) A utilização de receptores GPS de levantamentos geodésicos, associada a utilização do modelo elaborado neste trabalho permitirá a determinação de altitudes ortométricas compatíveis com o sistema de nivelamento geométrico do Município de Porto Alegre com uma precisão melhor que 5 cm, conforme a precisão interna do modelo demonstrada no capítulo 2.3.6;

2) A importância da observação dos tempos mínimos de ocupação, distância da base e precauções necessárias para a obtenção de resultados compatíveis com os que foram neste trabalho apresentados;

3) A adoção de rastreamento simultâneo a partir de mais de uma estação base proporcionou a este trabalho uma nova e eficaz ferramenta de validação de resultados de processamentos geodésicos;

4) O programa construído a partir deste projeto permite calcular a ondulação geoidal, para a área em estudo, tendo como argumento de entradas as coordenadas de pontos no sistema UTM.

Face aos resultados encontrados deixam-se as seguintes recomendações:

- 1) Que a UFRGS faça gestões junto à Prefeitura do Município de Porto Alegre para ver a possibilidade de se fazer um ajustamento na rede altimétrica do Município; e,
- 2) Que a UFRGS pense na possibilidade de fazer um modelo geoidal para o Estado do Rio Grande do Sul para atender a comunidade cartográfica.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANA, J.M. *O Uso de GPS na Elaboração de Carta Geoidal*. 2000. f.180. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

BRANDÃO, A.C. *Carta Geoidal dos Municípios de Salvador e Lauro de Freitas - Bahia - Resultados Preliminares*. Salvador: Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Departamento de Transportes. Laboratório de Geomensura Theodoro Sampaio
Disponível em: http://www.cartografia.org.br/xixcbccd/artigos/c2/CII-66/CII_66.pdf . Acesso em: maio 2002.

BURSA, M.; PEC, K. *Gravity Field and Dynamics of the Earth*. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 333p.

CASTRO, A.L.P. *Nivelamento através do GPS: Avaliação e Proposição de Estratégias*
Disponível em: http://www2.prudente.unesp.br/pos/cpgcc/proj_alunos/andre.htm . Acesso em: maio 2002.

DEHLINGER, P. *Marine Gravity*. Amsterdam: Elsevier, 1978.

DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A.G. *GSLIB-Geoestatistical Software Library and User's Guide*. 2.ed. Oxford: University Press, 1998.

ENGLUND, E.; SPARKS, A. - *GEO-EAS 1.2.1.: Geostatistical Environmental Assessment Software. User's Guide*. United States Environmental Protection Agency, 1991. Conjunto de programas. Disponível em: <http://www.sph.umich.edu/~aelon/geoeas/> .

GARCÍA-TEJERO, F.D. *Topografía Abreviada*. Madrid: Mundi-Prensa, 1997. 390p.

GEMAEL, C. *Introdução à Geodésia Física*. Curitiba: Editora da UFPR, 1999. 304p.

HEITZ, S. *Coordinates in Geodesy*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 255p.

IBGE. *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Nacional (IBGE - Resolução PR nº 22, de 21 de julho de 1983)*. Acesso em: set 2002.
Disponível em: <http://www.concar.ibge.gov.br> .

IBGE. *Geóide 1992 (IBGE)*. Acesso em: maio 2002.
Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/ibge/geografia/geodesico> .

IBGE. *Maregrafia no IBGE*. Acesso em: maio 2002.
Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/ibge/geografia/geodesico> .

IBGE. *Rede Altimétrica (IBGE)*. Acesso em: maio 2002.
Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/ibge/geografia/geodesico> .

JOURNAL, A.G. Non-parametric estimation of spatial distribution. *Mathematical Geology*, v.15, n.2, p. 445-468, 1983.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R.; MONTEIRO, R. C. *Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada*. Geomatématica, Texto Didático 7, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, 2002. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html> . Acesso em: set 2002.

LEITE, O.H.S. *Marés Terrestres e sua importância na Geodésia*. Curitiba: Editora da UFPR, 1986.

LOCH, C.; CORDINI, J. *Topografia Contemporânea. Planimetria*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 320p.

MONICO, J.F.G. *Posicionamento Pelo Navstar - GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: Editora da UNESP, 2002. 287p.

OLIVEIRA, K.C.L.; THOMAZ, H.R.; MONICO, J.F.G. *Modelo Geoidal local para a região de Presidente Prudente*. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Cartografia

Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xixcbccd/artigos/c2/CII-54/MODELO.pdf> . Acesso em: maio 2002.

PESSOA, L.M.C. Curso de GPS – Elementos Básicos e Avançados. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 20, 2001, Porto Alegre.

PESSOA, L.M.C. Determinações Altimétricas: Aspectos Práticos. Fator Gis, n.12, jan/mar., 1996.

PORTO ALEGRE. PREFEITURA MUNICIPAL. *A Cidade – Dados Gerais*. Acesso em: jun 2002. Disponível em: <http://www.portoalegre.rs.gov.br/> .

ROMÃO, V.M.C.; PORTUGAL, J.L.; ANDRADE, E.D.V. *Estudo do uso do GPS na definição de uma Superfície Geoidal Local*. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Cartográfica.

Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xixcbccd/artigos/c2/CII-01/cbc99.pdf> . Acesso em: maio 2002.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy – Foundations, Methods and Applications*. Berlin: Walter de Gruyter, 1993. 531p.

¹**SILVA, A.S.** ¹**SILVA, M.C.** ¹**COELHO, L.Z.** ²**ROMÃO, V.M.C.** “*Mapa Geoidal Local usando GPS*”.

¹Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Setor de Engenharia de Agrimensura

²Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociências. Departamento de Engenharia Cartográfica

STURARO, J.R.; LANDIM, P.M.B. *Geoestatística indicativa aplicada à análise espacial*. In. SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA. LA SOCIEDAD LATINOAMERICANA DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL, 7., 1995, p.68-73. **Boletim de Resumos Expandidos**.

STURARO, J.R. *Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento*, 1994. 183f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos.

STURARO, J.R.; LANDIM, P.M.B.; RIEDEL, P.S. *O emprego da técnica geoestatística da krigagem indicativa em Geotecnia Ambiental: Revista Solos e Rochas*, v.23, n.3, p.157-164, 2000.

SURFER 6.0: (1995) – *User’s guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers*: Golden Software, Inc.

¹**TEIXEIRA, N.N.** ¹**FERREIRA, L.D.D.** ²**GARNÉS, S.J.A.** *Carta Geoidal de Belo Horizonte : Fase Preliminar*

¹Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR

²Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal

Disponível em: <http://www.geodesia.ufsc.br/geodesia-online/arquivo/Cob2000-a.htm> . Acesso em: maio 2002.

TEUNISSEN, P.J.G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 650p.

VANÍČEK, P., J. HUANG, P. NOVÁK, S. PAGIATAKIS, M. VÉRONNEAU, Z. MARTINEC, W. E. Featherstone. Determination of the boundary values for the Stokes-Helmert problem. *Journal of Geodesy* 73, p.180-192, 1999.

VANÍČEK, P.; KRAKIWSKI, E. *Geodesy: The Concepts*. Amsterdam: Elsevier, 1992. 697p.

5. ANEXOS

- 5.1 Coordenadas da RBMC – Características de Rastreio
- 5.2 Coordenadas da RIBAC – Características de Rastreio
- 5.3 Coordenadas da SPG – Características de Rastreio
- 5.4 Planilha Geral de Resultados
- 5.5 Fichas de Descrição de RRNN rastreadas com GPS, Planilhas de Campo contendo informações sobre Levantamento de cada RN, Relatórios de Processamento das RRNN em relação à RIBAC, SPG e RBMC
- 5.6 Mapa de Isocurvas de Ondulação Geoidal Observada em Porto Alegre (Modelo Geoidal Local Geoidepoa)
- 5.7 Ilustração Temática de Bandas de Ondulação Geoidal (Modelo Geoidal Local Geoidepoa)
- 5.8 Ilustração Temática de Bandas de Ondulação Geoidal segundo o Mapa do IBGE (Modelo Geoidal Mapgeo92)
- 5.9 Ilustração Temática de Bandas de Ondulação Geoidal segundo O Modelo Geoidal Global EGM96
- 5.10 Fotos
- 5.11 Fichas de Descrição de RRNN não localizadas

AGRADECIMENTOS

- Ao orientador Prof. Dr. Francisco Humberto Simões Magro;
- À Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
- À Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos da Secretaria do Planejamento Municipal de Porto Alegre, em especial ao Eng^o Antônio Pasquetti Piccoli, Eng^a Suzete Maria Michalski Peres, Eng^o Luiz Carlos Roveda de Oliveira e Eng^o Leandro Costa de Souza, por ter cedido a relação de RRNN da Região de Porto Alegre;
- À Empresa SPG - Soluções em Posicionamento Global Ltda. pelo empréstimo de equipamentos de levantamento;
- Ao Tiago Rutsatz Salomoni, funcionário da Empresa SPG;
- Ao Paulo Renato de Oliveira Sobragi, funcionário do Instituto de Geociências da UFRGS.