

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOMÁTICA**

**EXATIDÃO DAS COORDENADAS TOPOGRÁFICAS DE
PONTOS OBTIDAS A PARTIR DE LEVANTAMENTOS
GEODÉSICOS COM RECEPTOR GPS L1-L2 NO MÉTODO
RELATIVO SEMIESTÁTICO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

Marco Ivan Rodrigues Sampaio

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**EXATIDÃO DAS COORDENADAS TOPOGRÁFICAS DE
PONTOS OBTIDAS A PARTIR DE LEVANTAMENTOS
GEODÉSICOS COM RECEPTOR GPS L1-L2 NO MÉTODO
RELATIVO SEMIESTÁTICO**

por

Marco Ivan Rodrigues Sampaio

Monografia apresentada ao Curso de Especialização do Programa de Pós-Graduação em Geomática, Área de Concentração em Tecnologia da Geoinformação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Geomática.**

Orientador: Prof. Dr. Gelson Lauro Dal’Forno

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

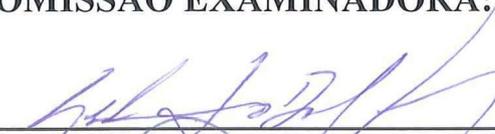
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Monografia de Especialização

**EXATIDÃO DAS COORDENADAS TOPOGRÁFICAS DE PONTOS
OBTIDAS A PARTIR DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS COM
RECEPTOR GPS L1-L2 NO MÉTODO RELATIVO SEMIESTÁTICO**

elaborada por
Marco Ivan Rodrigues Sampaio

como requisito parcial para obtenção do grau de
Especialista em Geomática

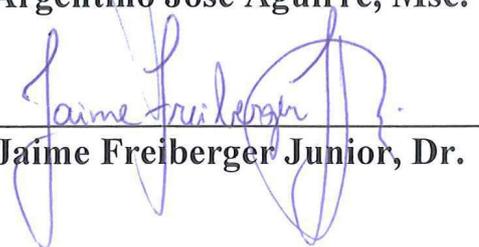
COMISSÃO EXAMINADORA:



Gelson Lauro Dal'Forno, Dr.
(Presidente/Orientador)



Argentino José Aguirre, Msc.



Jaime Freiburger Junior, Dr.

Santa Maria, 06 de janeiro de 2011

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou e me apoiou na realização dos meus objetivos. À minha mulher Ediane Girardi Viera Sampaio e à sua família, que compartilharam comigo, de certa forma, todos os momentos de dificuldades e de alegria vivenciados durante a elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a DEUS, pelas oportunidades a mim oferecidas, pelo bom senso em percebê-las e pela capacidade de aproveitá-las.

Aos meus pais Ivan Motta Sampaio (in memorian) e Alice Rodrigues Sampaio, por estarem sempre presentes e pelo incentivo constante à minha dedicação aos estudos, a minha eterna gratidão. Esta vitória eu devo também a vocês.

Aos meus irmãos, irmãs, sobrinhos, tios, tias, cunhados e cunhadas, pelo incentivo, apoio e compreensão. Um agradecimento especial, em memória, à minha irmã Ilka Sampaio e ao meu cunhado Antônio da Silva.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gelson Lauro Dal’Forno, pela cordialidade e pela paciência que me dispensou em todas as fases deste trabalho e de nossa convivência. Meus agradecimentos pela confiança, orientação, apoio, estímulo e principalmente, pela franqueza, carinho e amizade. Professor, sem o a sua colaboração não teria conseguido esse êxito.

Meu agradecimento, de uma maneira especial e carinhosa, ao meu pai Ivan Motta Sampaio que nesse momento se encontra com DEUS, à minha esposa Ediane Girardi Viera Sampaio incentivadora de todos os meus projetos de vida e fonte de apoio, incentivo e encorajamento na conclusão deste estudo. Palavras não expressam a minha gratidão.

Aos meus amigos (as), Angélica Cirolini, Víctor Luiz Lutz, Andreise Moreira, Henrique, pelas palavras de apoio nos momentos mais difíceis, pelas conversas e pela logística, minha sincera gratidão. Vocês todos, foram e serão muito importantes para mim.

Aos colegas estagiários do laboratório de Geodésia Aplicada pelas suas disponibilidades, colaboração e amizade.

Aos Eng. Agrônomos e amigos Fernando Luiz Hillebrand e Daniel Pimentel pela amizade, colaboração e sugestões.

Um agradecimento especial à empresa TOPOGRAPHIA Planejamento Rural S/S Ltda, pelo empréstimo dos equipamentos utilizados para a realização do trabalho e pelo apoio logístico durante a execução do estudo.

Ao Prof. Msc. Argentino José Aguirre e pela ajuda e apoio na elaboração da monografia e por fazer parte da banca examinadora.

Ao Prof. Dr. Jaime Freiburger Junior, pela gentileza de ser banca examinadora da monografia, meus sinceros agradecimentos.

Ao CRS/INPE pela disponibilização do espaço físico e pela logística dispensada.

A Comissão de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo financiamento ao aperfeiçoamento da mão de obra qualificada deste País.

RESUMO

Monografia de Especialização
Programa de Pós-Graduação em Geomática
Universidade Federal de Santa Maria

EXATIDÃO DAS COORDENADAS TOPOGRÁFICAS DE PONTOS OBTIDAS A PARTIR DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS COM RECEPTOR GPS L1-L2 NO MÉTODO RELATIVO SEMIESTÁTICO

AUTOR: MARCO IVAN RODRIGUES SAMPAIO

ORIENTADOR: GELSON LAURO DAL'FORNO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de janeiro de 2011

O surgimento da geodésia por satélites revolucionou os levantamentos geodésicos. No entanto, o aproveitamento dos resultados daí advindos para o plano topográfico local, apresenta problemas operacionais. Um método, no qual se aplicam translações e rotações ao sistema cartesiano ortogonal tridimensional para transformá-lo em um sistema de coordenadas terrestre geodésico local pode ser empregado e permitir resultados precisos, com exatidão compatíveis a aplicação. O objetivo deste trabalho foi de obter um modelo digital de terreno (MDT) a partir da coleta de coordenadas de pontos com o sistema GPS no método rápido estático, e transformá-las em coordenadas locais comparando com o modelo obtido a partir das coordenadas determinadas por taqueometria eletrônica. Receptores GPS de dupla frequência e uma estação total foram usados nos levantamentos. O levantamento foi executado em uma área na cidade de Santa Maria, Brasil. Os resultados das coordenadas locais a partir das coordenadas GPS foi compatível com plantas da Classe B e C na escala de 1:1000 ou menores, e com curvas de nível com equidistância de um metro conforme o estabelecido pelo Decreto 89.817/84 ou a escala 1:2500 com curvas de nível espaçadas de um metro e meio, quando referidas as especificações do NSSDA.

Palavras-chave: Coordenadas geodésicas, coordenadas locais, plano topográfico, MDT, GPS NAVSTAR.

ABSTRACT

Monografia de Especialização
Programa de Pós-Graduação em Geomática
Universidade Federal de Santa Maria

ACCURACY OF THE TOPOGRAPHIC COORDINATES OF POINTS OBTAINED FROM THE GEODETIC SURVEY WITH GPS L1-L2 RECEPTOR IN THE SEMISTATIC RELATIVE METHOD

AUTOR: MARCO IVAN RODRIGUES SAMPAIO

ORIENTADOR: GELSON LAURO DAL'FORNO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de janeiro de 2011

The appearance of the satellite in geodesy revolutionized the geodesic survey. However, the utilization of results obtained in surveys of local topographic planes, using the traditional methodology, present some operational problems. A methodology, in which Earth rotation movements are applied to the Tridimensional Orthogonal Cartesian System in order to transform it into a system of local geodesic terrestrial coordinates can be used, giving precise results and accuracy compatible to the application. The objective of this study was to obtain a terrain digital model (TDM), based on point coordinates gathered via GPS set on the rapid static method, and to transform them in local coordinates, comparing this model to the one gained from the coordinates determined through electronics tacheometry. To do so a double frequency GPS receiver and a total station were the equipments used in this survey. The comparative study was done in an area of the city of Santa Maria (RS, Brazil), and the results of local coordinates acquired from the GPS coordinates, were compatible with plans of B and C classes in a scale of 1:1000 or less, as well as with level curves of equidistance level of one meter, according to the established by the 89.817/84 Decree, or in a scale of 1:2500 with level curves spaced out in one meter and a half, when these refer to specifications of NSSDA.

Key-words: geodesic coordinates, local coordinates, topographic planes, MDT, GPS NAVSTAR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Representações do sistema astronômico de coordenadas local, (u, v, w) e do sistema geodésico de coordenadas local (r, s, t) .	17
Figura 02	Coordenadas do ponto (P) referidas ao Sistema de Coordenadas Geodésicas Cartesianas Ortogonais (X, Y, Z) , vistas em conjunto com as coordenadas elipsoidais geodésicas φ, λ, h .	18
Figura 03	Sistema de coordenadas terrestre local (Sistema geodésico local) visto em conjunto com o sistema geodésico de coordenadas cartesiano tridimensional e associados a um mesmo ponto. $(u = N, t = E, v = U)$.	19
Quadro 01:	Tabela dos valores de EP e do PEC para as três classes de documentos cartográficos.	22
Tabela 01	Tabela para o cálculo da estatística da acurácia horizontal – adaptado de Minnesota Planning (2000).	27
Tabela 02	Tabela para o cálculo da estatística da acurácia vertical – adaptado de Minnesota Planning (2000).	28
Figura 04	Croqui da área levantada mostrando os pontos e a Estação SMAR da RBMC em escala aproximada.	33
Figura 05	Imagem do google earth que mostra o posicionamento da área de estudo em relação ao Campus da UFSM.	34
Figura 06	Imagens do GPS Hiper GGD da TOPCON e da estação total modelo TPS 805 da LEICA.	35
Tabela 03	Discrepância entre as coordenadas topográficas e as coordenadas topográficas transformadas a partir do GPS. Tempo e taxa de rastreamento. – 19 pontos da primeira etapa.	38
Tabela 04	Discrepância entre as coordenadas topográficas e as coordenadas topográficas transformadas a partir do GPS. Tempo e taxa de rastreamento. – 80 pontos da segunda etapa.	39
Figura 07	Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo t (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.	41
Figura 08	Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo u (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.	42
Figura 09	Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo v (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.	42
Figura 10	Distribuição de frequências da discrepância total no plano horizontal (t, u) (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.	42
Tabela 05	Médias e desvios padrões das discrepâncias obtidas com os 99 pontos	43
Tabela 06	Valores de EP e PEC para cartas na Esc. 1:1.000.	44
Tabela 07	Valores de $\Pi^2_{t, n-1}$, $\Pi^2_{t, n-1}$, e $\Pi^2_{tu, n-1}$ para as diversas classes (Escala 1:1.000).	44
Figura 11	Figura representativa das curvas de nível e suas discrepâncias, obtidas a partir dos dois modelos digitais do terreno (MDT).	46

LISTA DE ABREVIATURAS

- CAD** – Desenho Assistido por Computador
- EP** – Erro Padrão
- GNSS** - Global Navigation Satellite System
- GPS** - Global Positioning System
- LTM** – Local Transversa de Mercator
- MDT** - Modelo digital do terreno (MDT)
- NSSDA** - National Standard for Spatial Data Accuracy
- PEC** – Padrão de Exatidão Cartográfica
- PTL** - Plano Topográfico Local
- RBMC** – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
- RMS** - Root Mean Squared - Erro Médio Quadrático
- RMSE** – Root Mean Squared Error – Raiz do Erro Médio Quadrático
- SMAR** – Estação da RBMC de Santa Maria/RS
- RTM** – Regional Transversa de Mercator
- SAD 69** – South American Datum of 1969
- SGL**- Sistema Geodésico Local
- SIG** – Sistema de Informação Geográfica
- SIRGAS** – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
- SFT** – Superfície Física da Terra
- TM** - Transversa de Mercator
- UTM** – Universal Transversa de Mercator
- WGS 84** – World Geodetic System 1984

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	13
1.2 Conteúdo da monografia	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 A Superfície Física da Terra e suas Representações	15
2.1.1 A Superfície Física da Terra	15
2.1.2 Elipsóide de revolução	15
2.1.3 Plano Topográfico Local (PTL)	16
2.1.4 Sistema Geodésico de Coordenadas Cartesianas Tridimensional	17
2.1.5 Sistema de Coordenadas Terrestre Local	18
2.1.6 Transformações entre Sistema de Coordenadas Geodésicas e Sistema do Plano Topográfico Local	19
2.1.6.1 Transformação do sistema geodésico cartesiano tridimensional para o sistema geodésico de coordenadas terrestre local	20
2.1.6.2 Transformação do sistema de coordenadas terrestre local para o sistema geodésico cartesiano tridimensional	20
2.2 Critérios de qualidade posicional	21
2.2.1 O Decreto 89.817/84	21
2.2.2 Especificação para a classificação de cartas	23
2.2.3 A especificação norte americana	25
2.2.4 Normativas da estatística da acurácia do NSSDA	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Local	32
3.2 Material	32
3.3 Métodos	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Resultados obtidos e o Decreto 89.817/84	43
4.2 Resultados e o NSSDA	44
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	47
BIBLIOGRAFIA	48

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico na área de Geoprocessamento, nos dias atuais, a obtenção coordenadas de pontos sobre a superfície da Terra em diferentes sistemas de coordenadas tornou-se usual. A evolução do teodolito para a estação total, o surgimento do GPS (Global Positioning System) e o desenvolvimento na área da informática apontam uma nova forma de obtenção e processamento de dados em Geodésia. Sendo, comum, hoje em dia, a convivência ou a união de levantamentos efetuados com estações totais e com receptores de sinais GNSS (Global Navigation Satellite System).

Os profissionais que exercem suas atividades na área de geoprocessamento, constantemente, se defrontam com problemas que se referem à inconsistência de dados no posicionamento geométrico de pontos da superfície da Terra. Essas inconsistências, na maioria das vezes, estão relacionadas ao emprego de equipamentos diversos e que expressam seus resultados em referenciais diferentes.

Tal situação que é bem caracterizada quando em levantamentos de pontos da superfície terrestre se empregam, isolada, concomitante ou integradamente, os receptores GNSS e os taqueômetros eletrônicos, comumente denominados estações totais e se deseja sua inter-relação.

No caso da utilização dos receptores de sinais GNSS, as coordenadas resultantes do processamento dos dados coletados estão referidas ao modelo geométrico de aproximação da Terra conhecido por referencial geodésico elipsóidico. Nesse referencial, as coordenadas são geodésicas e referidas a um sistema cartesiano ortogonal tridimensional, cuja origem é o centro de massas da Terra. Por sua vez, quando os taqueômetros eletrônicos são os equipamentos usados para a definição dos pontos, as coordenadas obtidas para os mesmos estão referidas a um Plano Topográfico Local estabelecido na altitude ortométrica do ponto origem do levantamento ou a uma altura arbitrária denominada de cota.

Daí resulta, que um mesmo ponto, georreferenciado pelos dois métodos, apresentam resultados diversos, pois não estão vinculados a um mesmo sistema de referência. No primeiro caso as distâncias e os ângulos obtidos estão sobre o elipsóide de referência e são elementos curvilíneos, enquanto que no método topográfico os mesmos elementos são retas e ângulos planos medidos sobre o

referencial Plano Topográfico Local. Sendo assim, para se compatibilizar esses levantamentos é necessária a transformação dos resultados obtidos para um único sistema de referência.

Quando se deseja que as medidas efetuadas por processos topográficos sejam, posteriormente, transformadas em medidas geodésicas, são empregadas fórmulas. Entre essas fórmulas, que merecem citação pelo seu uso frequente, encontram-se as fórmulas de Puissant (Zanetti, 2007, pg 76) e as de Sodano (Scribd, pg. 41). Essas transformações, na prática, denominam-se de transporte de coordenadas mediante a aplicação do problema direto.

Já a transformação de coordenadas geodésicas para o Sistema Topográfico Local, no Brasil, é regulamentada pela Norma Brasileira 14166:1998, (NBR 14.166 – Rede de referência cadastral municipal – Procedimento) que estabelece a aplicação do formulário de Puissant para o denominado problema inverso.

Conforme Dal’Forno, *et al.*:

O processo de transformação de coordenadas do Sistema Topográfico Local para o Sistema Geodésico (Global, Regional ou Local), apesar de envolver um bom número de equações, não apresenta problemas para a sua execução nos dias atuais. No entanto, o processo inverso está condicionado à elevação do plano topográfico local à altitude ortométrica média da área do levantamento, que condiciona a abrangência do sistema. Nessa área, a diferença de nível entre dois pontos quaisquer fica limitada à ordem do erro relativo desejado, sendo que a NBR 14166:1998 estabelece que seja de 150 m o limite máximo para a diferença de nível entre o plano topográfico local e qualquer ponto projetado, o que mantém o erro relativo menor que 1/40.000. O procedimento dessa transformação pode introduzir discrepâncias nos resultados, pois, se forem escolhidas alturas médias de referência, de tal forma que a diferença seja maior que o limite pré-fixado, um mesmo ponto apresentará coordenadas topográficas locais com erro relativo superior àquele estabelecido (Dal’Forno, *et al.*, 2008a p. 79).

Além das alternativas de transformação apresentadas, outra abordagem vem sendo aplicada (Dal’Forno, *et al.*, 2008b) para migrar de um sistema de referência para o outro de uma maneira rápida e acurada. A aplicação se baseia na teoria que permite a transformação de referenciais cartesianos geodésicos em cartesianos locais, bem como a sua operação inversa. Tal teoria está desenvolvida em Andrade (1998, p. 74), Monico (2008, p. 150-152) e em Jekeli (2006, p. 2-49-2-54) e consiste basicamente na translação e rotação de sistemas de eixos cartesianos.

A maior parte dos profissionais capacitados executa as transformações de coordenadas geodésicas para um dos sistemas de projeções cartográficas transversas de Mercator (TM), mas são poucos os trabalhos técnicos e científicos desenvolvidos para estabelecer o georreferenciamento dos pontos no plano topográfico, uma situação indispensável a uma correta implantação de obras de engenharia e que aplicam o método, referido no parágrafo anterior, plenamente consagrado, de transformação de referenciais. Assim, aplicar e testar o comportamento desse método nos mais variados problemas topográficos e geodésicos, tanto teóricos como práticos, se torna imprescindível.

A aplicação e teste desse método, em princípio, já justificam este trabalho. Além disso, outros benefícios científicos e aplicados advirão do que aqui se propõe. Entre estes, merecem destaque: *i)* a maior facilidade e exatidão na implantação e controle de obras de engenharia; *ii)* a maior rapidez na execução e processamento de levantamentos; *iii)* a menor ociosidade de equipamentos; e *iv)* o trânsito rápido, preciso e fácil entre os sistemas geodésicos e topográficos e a representação cartográfica nos sistemas de projeção TM (UTM, RTM e LTM).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos principais desenvolver e testar a aplicação da transformação entre os referenciais cartesianos geodésico e o cartesiano local (PTL) empregando como fundamento matemático principal a translação e a rotação entre os sistemas na mesma escala. Assim, pretende-se gerar um levantamento planialtimétrico no PTL, a partir de levantamento geodésico de pontos efetuado com receptor GPS, em modo relativo estático e rápido estático, comparando-o com o levantamento planialtimétrico no PTL obtido a partir do levantamento topográfico executado com estação total.

Como objetivos secundários do estudo, buscam-se: *i)* determinar o tempo mínimo de rastreamento para cada ponto, que possa ser confiável, considerando-se a precisão e exatidão do levantamento; *ii)* comparar estatisticamente os resultados obtidos, após a transformação em coordenadas locais, com os dados obtidos por levantamento taqueométrico; *iii)* estabelecer um indicador da qualidade posicional

dos valores obtidos, segundo a especificações estabelecidas no Decreto 89.817/84 - Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (1984) e também, pelas propostas pelo “*National Standard for Spatial Data Accuracy*” (NSSDA, 1998) destinadas a medir e classificar a qualidade de dados geográficos; iv) comparar os modelos digitais do terreno (MDT) gerados a partir de ambos levantamentos.

1.2 Conteúdo da Monografia

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Segue, abaixo, uma breve descrição de cada um deles:

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o assunto a ser abordado, os objetivos a serem alcançados e a justificativa desta pesquisa. Apresenta, ainda, uma visão geral do conteúdo do trabalho.

Capítulo 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo subdivide-se em dois conteúdos. O primeiro apresenta a Superfície Física da Terra, as suas diversas aproximações e as suas inter-relações. O segundo descreve os Critérios de Qualidade Posicional onde se apresentam as especificações de controle da qualidade posicional estabelecidas, tanto pelo Decreto 89.817/84, como pelo NSSDA e os respectivos métodos aplicáveis.

Capítulo 3: MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é descrita a área física do levantamento, os equipamentos e programas empregados e os métodos aplicados para a obtenção dos resultados.

Capítulo 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo se apresenta os dados processados, os resultados e as análises individuais obtidos.

Capítulo 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são expostas as conclusões e as recomendações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Superfície Física da Terra e suas Representações

2.1.1 A Superfície Física da Terra

Para Torge (2001) a Superfície Física da Terra (SFT) é formada pelo contato entre a atmosfera e as massas sólidas ou líquidas terrestres. O autor salienta que o fundo dos oceanos está incluído nessa formulação, pois é a superfície limite entre o corpo sólido terrestre e as massas de água do oceano.

Essa superfície sólida da Terra tem um formato totalmente irregular e é nela que se efetuam as diversas operações topográficas e geodésicas. Diante da grande quantidade de variáveis envolvidas, não se pode representá-la mediante um modelo matemático simples, impossibilidade que implica na necessidade de serem efetuadas simplificações em sua forma. Essas simplificações, representadas pelo geóide e pelas superfícies de referência (elipsóide, esfera e PTL), possibilitam a expressão matemática dessas operações topográficas e geodésicas.

Entre esses modelos, merecem especial atenção, no presente trabalho o elipsóide e o plano topográfico local, sobre os quais se efetuam os cálculos para a determinação das coordenadas dos pontos.

2.1.2 Elipsóide de revolução

A escolha da figura do elipsóide de revolução terrestre para a representação do geóide apóia-se na comprovação de Newton (1687) de que a Terra era achatada nos polos e com o formato semelhante a de um elipsóide de revolução (Seeber, 2003; Leick, 1990, Torge, 2001). Também demonstra que o eixo menor do elipsóide de revolução coincidia com o eixo de rotação da Terra.

O elipsóide de revolução terrestre é um sólido geométrico gerado pela rotação de uma elipse em torno de seu eixo menor e apresenta uma forma geométrica suave e conveniente às operações geodésicas.

Um elipsóide é definido em forma e dimensões, normalmente, pelos parâmetros:

- i) semieixo maior (a), e
- ii) achatamento (f ou α)

O achatamento é dado pela fórmula:

$$f = 1 - \frac{b}{a} \quad (2.1)$$

onde, b é o semieixo menor.

Pontos da superfície da Terra quando definidos em relação a um elipsóide de referência têm as suas coordenadas expressas no Sistema Cartesiano Ortogonal Tridimensional (X , Y , Z) ou em coordenadas elipsoidais geográficas (latitude e longitude geodésicas e altura elipsoidal).

2.1.3 Plano topográfico local (PTL)

O plano topográfico local desconsidera a curvatura da terra e é perpendicular a vertical do lugar no ponto da superfície terrestre considerado como origem do levantamento. Nessa simplificação não se leva em conta os erros sistemáticos provenientes da desconsideração da curvatura terrestre e do desvio da vertical. Esse plano também pode ser estabelecido em função da normal ao elipsóide.

Esse plano pode ser definido em relação ao vetor gravidade local (sistema astronômico local) ou a uma normal local ao elipsóide (sistema geodésico local). Os desenvolvimentos para ambos são idênticos, onde a única diferença no final é a especificação da latitude e longitude (astronômica ou geodésica), isso é, a direção da vertical (Jekeli, 2006).

A figura 01 apresenta as configurações desses dois planos topográficos locais, caracterizando as suas diferenças.

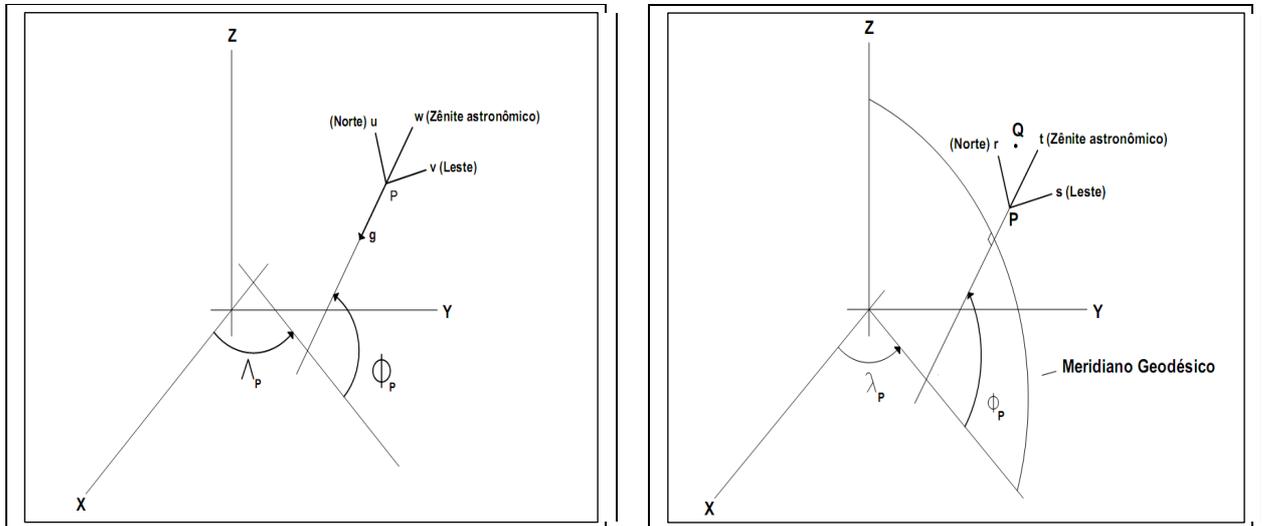


Figura 01: Representações do sistema astronômico de coordenadas local, (u, v, w) e do sistema geodésico de coordenadas local (r, s, t) .

Fonte: Jekeli, 2006.

2.1.4 Sistema Geodésico de Coordenadas Cartesiano Tridimensional

O Sistema de Coordenadas Cartesianas Tridimensionais é estabelecido no elipsóide de revolução e é constituído de três eixos ortogonais. A origem do sistema é a intersecção dos dois eixos da elipse; o eixo X está contido no plano equatorial e é positivo na direção da longitude 0° e o eixo Y, também situado no plano equatorial, é positivo no sentido Leste. O eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da terra e é positivo no sentido Norte. Se a origem do sistema está localizada no centro de massas da Terra, suas coordenadas são denominadas de geocêntricas e, em caso contrário, de topocêntricas.

Os sistemas WGS-84 e SIRGAS são casos típicos de sistema geocêntrico, o SAD69 é um sistema topocêntrico. As coordenadas (X, Y, Z) , nesses sistemas, são expressas em função da latitude e da longitude geodésica, além da pequena normal e da grande normal ao elipsóide.

Os sistemas geocêntricos de coordenadas passaram a ter grande importância após o surgimento do sistema GPS, ou seja, da Geodésia por Satélites. As coordenadas fornecidas pelo sistema GPS são geocêntricas cartesianas

tridimensionais. Fórmulas especiais transformam essas coordenadas cartesianas em coordenadas elipsoidais (latitude, longitude e altura elipsoidal) e, posteriormente, caso haja necessidade, em coordenadas planas, tais como a projeção universal transversa de Mercator (UTM), para uso em engenharia (Monico, 2008; Gemael, 1981). A metodologia que aqui se propõe permite transformar, também, coordenadas geodésicas em coordenadas topográficas.

A figura 02 ilustra as coordenadas cartesianas, as coordenadas angulares e a altura elipsoidal do ponto P.

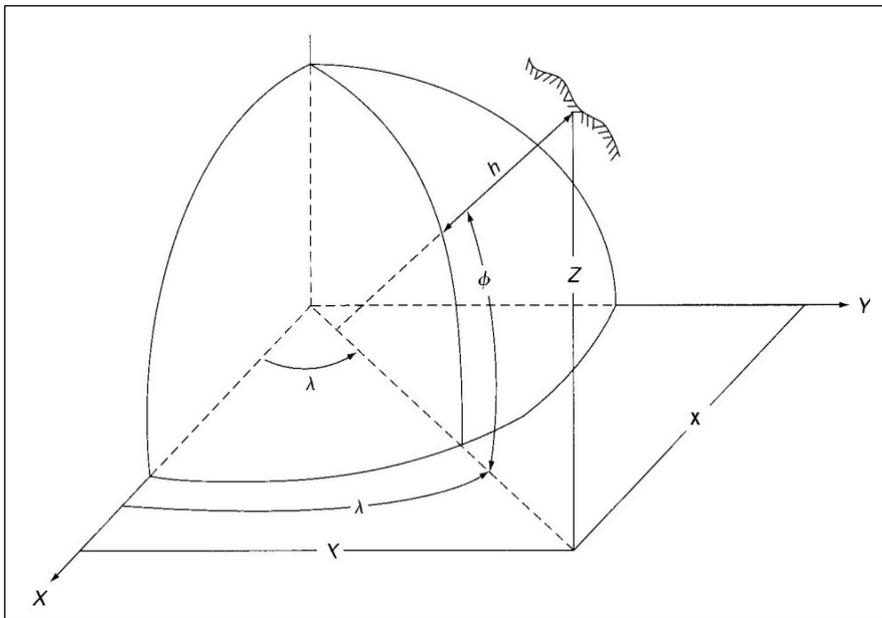


Figura 02: Coordenadas do ponto (P) referidas ao Sistema de Coordenadas Geodésicas Cartesianas Ortogonais (X, Y, Z), vistas em conjunto com as coordenadas elipsoidais geodésicas ϕ , λ , h .
Org: SAMPAIO, M.I.R, Setembro de 2010.

2.1.5 Sistema de Coordenadas Terrestre Local

Em Topografia, os pontos da superfície da Terra são projetados ortogonalmente sobre um plano horizontal tangente a essa superfície, que pode ter a sua tangência estabelecida no ponto inicial do levantamento. Esse plano, quando perpendicular à vertical do lugar, constitui um sistema astronômico local e, quando é definido considerando a normal ao elipsóide o sistema é denominado de geodésico local (Jekeli, 2006).

Para cada direção, as operações de campo se resumirão na determinação dos três elementos topográficos: distância horizontal, ângulo horizontal e distância vertical ou ângulo vertical associado à distância horizontal. Em muitas situações, é necessária a determinação da orientação da direção por meio do posicionamento do norte verdadeiro ou astronômico, o norte geodésico ou, ainda, o norte magnético.

Jekeli (2006) define o sistema de coordenadas local como cartesiano e consistindo de três eixos mutuamente ortogonais, embora nem sempre suas principais direções sigam as definições convencionais. Em mensuração, as direções são Norte (N), Leste (E), e para cima (U); em navegação são: norte, leste e para baixo, ou norte, oeste e para cima. As direções U, para baixo ou para cima, podem situar-se sobre a normal ou sobre a vertical.

A figura 03 apresenta um sistema geodésico local (SGL) onde o eixo u (N) aponta em direção ao norte geodésico, o eixo t (E) aponta para leste e é perpendicular ao eixo u ; ambos estão contidos no plano topográfico. O eixo v (U) coincide com a normal ao elipsóide que passa pelo ponto P e, no caso, a origem do sistema.

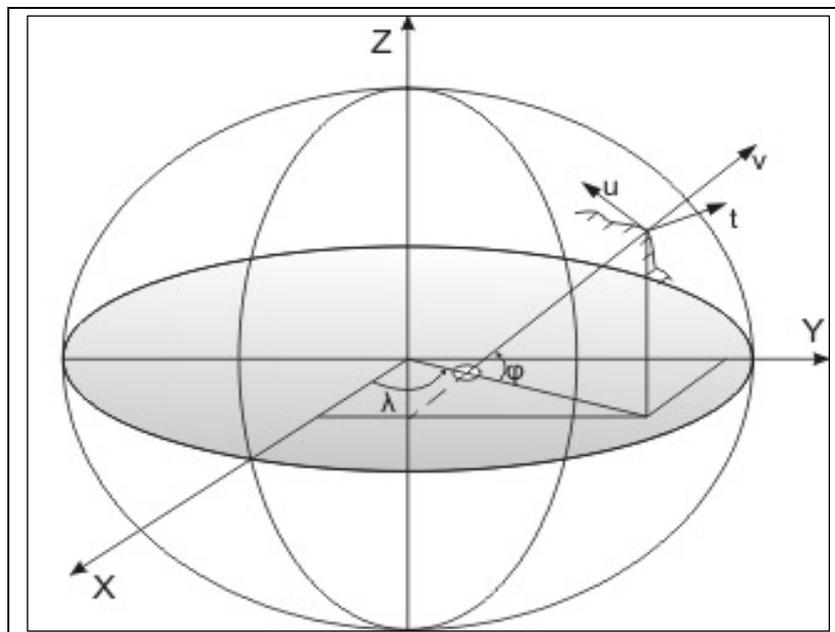


Figura 03: Sistema de coordenadas terrestre local (Sistema geodésico local) visto em conjunto com o sistema geodésico de coordenadas cartesiano tridimensional e associados a um mesmo ponto. ($u = N$, $t = E$, $v = U$).

Org: SAMPAIO, M.I.R, novembro de 2010.

2.1.6 Transformações entre Sistema de Coordenadas Geodésicas e Sistema do Plano Topográfico Local

2.1.6.1: Transformação do sistema geodésico cartesiano tridimensional para o sistema geodésico de coordenadas terrestre local

Para a transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas topográficas locais, na mesma escala, emprega-se a equação a seguir (Andrade, 1998, pg. 98).

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen } \varphi_0 & \text{cos } \varphi_0 \\ 0 & -\text{cos } \varphi_0 & \text{sen } \varphi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\text{sen } \lambda_0 & \text{cos } \lambda_0 & 0 \\ -\text{cos } \lambda_0 & -\text{sen } \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde:

- t, u e v são as coordenadas topográficas transformadas no PTL.
- φ_0 e λ_0 são a latitude e a longitude geodésica do ponto escolhido como origem do sistema;
- X, Y e Z são as coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais do ponto a transformar;
- X_0, Y_0 e Z_0 são as coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais do ponto escolhido para origem do sistema.

2.1.6.2 Transformação do sistema de coordenadas terrestre local para o sistema geodésico cartesiano tridimensional

Por sua vez, a transformação inversa é feita a partir da seguinte equação, (Andrade, 1998, pg. 98):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \lambda_0 & -\text{cos } \lambda_0 & 0 \\ \text{cos } \lambda_0 & -\text{sen } \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen } \varphi_0 & -\text{cos } \varphi_0 \\ 0 & \text{cos } \varphi_0 & \text{sen } \varphi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde:

- t, u e v são as coordenadas topográficas dos pontos, no PTL
- φ_0 e λ_0 são a latitude e a longitude geodésica do ponto escolhido como origem do sistema;
- X, Y e Z são as coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais

transformadas do ponto;

X_o , Y_o e Z_o são as coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionais do ponto escolhido para origem do sistema.

É importante salientar que, para a execução dessa transformação, é imprescindível que o levantamento topográfico esteja orientado segundo o azimute topográfico geodésico da direção de dois pontos comuns aos dois tipos de levantamento.

2.2 Critérios de Qualidade Posicional

No Brasil a análise da qualidade posicional de pontos destinados a elaboração de mapeamentos é regulada pelo Decreto 89817/84 que estabelece que todos os documentos cartográficos produzidos no país devem apresentar um indicador de qualidade.

Tal decreto destina-se à análise de cartas em formato analógico, pois a sua promulgação é anterior à cartografia digital. Para suprir essa lacuna, uma das alternativas viáveis é empregar os padrões norte americanos definidos pelo “*National Standard for Spatial Data Accuracy*” (NSSDA) e que se destinam a medir e descrever a qualidade de dados geográficos. Esses padrões se encontram no “*Positional Accuracy Handbook*” editado por *Minnesota Planning, Land Management Information Center* (2000) e no “*Geospatial Positioning Accuracy Standards – Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*” (Dal’Forno e Strieder, 2010).

2.2.1 O Decreto 89.817/84

O Decreto 89.817/84 - Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, no Capítulo II – Especificações Gerais, Seção 1 Classificação de uma Carta Quanto a Exatidão e Seção 2 Classes de Cartas, assim se manifesta:

Art.8º As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, segundo o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico – estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão - PEC = 1,6449 EP.

§3º O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Seção 2 Classes de Cartas

Art.9º As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

a - Classe A

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

b - Classe B

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c - Classe C

1. Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.
2. Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

O quadro 01 mostra de maneira resumida os valores do EP e do PEC correlacionados com as classes dos documentos cartográficos.

CLASSE	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	EP	PEC	EP	PEC
CLASSE A	0,3 mm	0,5 mm	1/3 Eq	1/2 Eq
CLASSE B	0,5 mm	0,8 mm	2/5 Eq	3/5 Eq
CLASSE C	0,6 mm	1,0 mm	1/2 Eq	3/4 Eq
OBSERVAÇÕES: EP = Erro-Padrão; PEC = Padrão de exatidão Eq = equidistância das curvas de nível. EP e PEC x módulo da escala da carta				

Quadro 01: Tabela dos valores de EP e do PEC para as três classes de documentos cartográficos

Fonte: Decreto 98.917/84

2.2.2 Especificações para a classificação de cartas

Para o controle da qualidade posicional faz-se a comparação entre os valores das coordenadas planas de pontos perfeitamente identificáveis na carta (X_{ci} , Y_{ci} , Z_{ci}) e suas homólogas obtidas através de dados de campo (X_{ti} , Y_{ti} , Z_{ti}).

Segundo Dal’Forno e Strieder (2010) esses pontos de referência normalmente são denominados de pontos de controle e devem possuir os seguintes requisitos: *i*) qualidade: o que significa valores de coordenadas precisas e exatas, para a finalidade específica e boa identificação tanto no terreno, como na carta usada como padrão e a carta a ser classificada; *ii*) distribuição espacial: a mais uniforme possível sobre toda a área em estudo; *iii*) quantidade: no mínimo a suficiente para se ter resultados significativos.

Os resíduos, entre as coordenadas de referência e as da carta, são calculados para cada eixo individualmente e para a discrepância resultante no plano XY:

$$\Delta_{X_i} = X_{ti} - X_{ci} \quad (3.1)$$

$$\Delta_{Y_i} = Y_{ti} - Y_{ci} \quad (3.2)$$

$$\Delta_{Z_i} = Z_{ti} - Z_{ci} \quad (3.3)$$

$$\Delta_{XY} = \sqrt{(\Delta_{X_i})^2 + (\Delta_{Y_i})^2} \quad (3.4)$$

Sendo, X_{ti} e Y_{ti} as coordenadas de referência e X_{ci} e Y_{ci} as coordenadas da carta e os Δ as discrepâncias.

Calculam-se a média, variância e erro máximo para cada resíduo por:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum \Delta}{n} \quad (3.5)$$

$$s^2 = \frac{\sum (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n - 1} \quad (3.6)$$

sendo n o número de pontos de controles estabelecidos.

As estatísticas calculadas com os resíduos resultantes das equações 3.1, 3.2 e 3.4 servem para estabelecer o controle de qualidade planimétrico da carta, e os obtidos pela equação 3.3 se aplica ao controle altimétrico.

Para realizar testes específicos para avaliação de tendência e exatidão planimétrica e altimétrica é recomendada a metodologia proposta por Merchant (1982), e que visa dois objetivos: i) a análise de tendência para sabermos se existem ou não a presença de erros sistemáticos; e, ii) a análise da exatidão que é realizado através da comparação, entre as variâncias das discrepâncias amostrais e os valores pré estabelecidos no Decreto 89.817/84.

Para a análise de tendência o teste normalmente empregado é o *Test t de Student* a um nível de confiança de 90% ($1-\alpha$, sendo $\alpha = 0,10$), para a média populacional (μ) a partir da média amostral (\bar{x}) e da variância amostral (s^2) conhecidas, conforme estabelece o Decreto 89.817/84 em seu artigo 8º.

Dal’Forno e Strieder (2010, p. 175) sugerem os passos seguintes para a aplicação desse teste:

Empregando-se a equação 3.5 se obtém os valores de $\bar{\Delta}_X$ e $\bar{\Delta}_Y$ que são as médias dos resíduos nas direções X, Y. Não é necessário calcular o valor de $\bar{\Delta}_{XY}$, pois se houver tendência em uma direção o mesmo acontecerá na direção resultante da composição no plano.

Procede-se os testes de hipótese:

a) para X:

H_0 : se $\bar{\Delta}_X = 0$, então X não é tendencioso.

H_1 : se $\bar{\Delta}_X \neq 0$, então X é tendencioso.

b) para Y:

H_0 : se $\bar{\Delta}_Y = 0$, então Y não é tendencioso.

H_1 : se $\bar{\Delta}_Y \neq 0$, então Y é tendencioso.

Calculam-se os valores amostrais de t_x e t_y com 18.7 e 18.8, e empregando a equação 3.6 para o cálculo de s_x e s_y :

$$t_x = \frac{1}{s_x} \bar{\Delta}_X n^{0,5} \quad (18.7)$$

$$t_y = \frac{1}{s_y} \bar{\Delta}_Y n^{0,5} \quad (18.8)$$

Verifica-se se os valores encontrados encontram-se no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula, que foi definido anteriormente:

$$|t_x| \leq t_{(n-1; \alpha/2)} \quad (18.9)$$

$$|t_y| \leq t_{(n-1; \alpha/2)} \quad (18.10)$$

Se valores de t não satisfizerem qualquer uma das desigualdades, rejeita-se a hipótese nula e diz-se que os dados apresentam tendência em um sentido. A presença de tendências é um indicativo de erros sistemáticos originados por causas variadas. Quando conhecidas seus efeitos podem ser minimizados subtraindo-se o seu valor em cada uma das coordenadas (da carta a classificar) empregadas no teste (Galo *et al* 1994).

Por sua vez, o teste de exatidão objetiva comparar o desvio padrão das discrepâncias amostrais (s) com os valores estabelecidos no Decreto 89.817/84 para o erro padrão esperado ($EP = \sigma$) para cada classe.

Dal’Forno e Strieder (2010, p.176) assim descrevem a metodologia sugerida:

Essa comparação é feita com o emprego do Teste de Precisão ou do Qui-quadrado onde são avaliadas as seguintes hipóteses:

a) para X:

$$H_0: s_x^2 = \sigma_x^2,$$

$$H_1: s_x^2 > \sigma_x^2$$

b) para Y:

$$H_0: s_y^2 = \sigma_y^2,$$

$$H_1: s_y^2 > \sigma_y^2$$

c) para a resultante XY

$$H_0: s_{xy}^2 = \sigma_{xy}^2,$$

$$H_1: s_{xy}^2 > \sigma_{xy}^2$$

Para tal avaliação precisa-se calcular, ou buscar em uma tabela, um valor limite para $\Pi^2_{n-1,\alpha}$ que deverá ser comparado com o valor do Π^2 calculado para as direções X, Y e XY.

Como o valor do EP é estabelecido para a resultante das discrepâncias, primeiramente decompõe-se este vetor EP em suas componentes X e Y tem-se:

$$\sigma_X = \sigma_Y = \frac{EP}{\sqrt{2}} \quad (18.11)$$

e

$$\chi^2_{X,n-1} = (n-1) \frac{s_X^2}{\sigma_X^2} \quad (18.12)$$

$$\chi^2_{Y,n-1} = (n-1) \frac{s_Y^2}{\sigma_Y^2} \quad (18.13)$$

$$\chi^2_{XY,n-1} = (n-1) \frac{s_{XY}^2}{\sigma_{XY}^2} \quad (18.14)$$

Assim, se $\Pi^2_{X,n-1} \leq \Pi^2_{n-1,\alpha}$ o documento tem precisão na direção X; se $\Pi^2_{Y,n-1} \leq \Pi^2_{n-1,\alpha}$ o documento tem precisão na direção Y, e se $\Pi^2_{XY,n-1} \leq \Pi^2_{n-1,\alpha}$ o documento tem precisão em relação à discrepância resultante.

2.2.3 A especificação norte americana

Como se viu, o Decreto 89.817/84 analisa somente documentos em formato analógico. A busca de padrões que contemplem a tecnologia digital é indispensável.

Uma das alternativas, e que pode ser aplicada comparativamente, é o emprego dos padrões norte americanos encontrados no “*National Standard for Spatial Data Accuracy*” (NSSDA) cuja finalidade é medir e descrever a qualidade de dados geográficos. Os conceitos sobre a estatística do NSSDA encontram-se no “*Positional Accuracy Handbook*” editado por *Minnesota Planning, Land Management Information Center* (2000) e no “*Geospatial Positioning Accuracy Standards – Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*”.

Segundo o *Positional Accuracy Handbook* o NSSDA foi elaborado levando em conta o desenvolvimento do SIG, onde existe uma rápida substituição do emprego de cartas analógicas por produtos digitais. O NSSDA foi desenvolvido para oferecer um método para estimar a acurácia dos dados geográficos, tanto na forma impressa, como na forma digital.

O *Minnesota Planning* (2000) afirma que as características básicas do NSSDA são: *i)* determinar valores estatísticos definidos usados para descrever os resultados do teste de acurácia; *ii)* descreve um método para testar a acurácia posicional de dados espaciais e *iii)* estabelece uma linguagem comum para informar a acurácia o que torna fácil avaliar a adequabilidade de uma base de dados.

Sete são os passos para a aplicação do NSSDA:

1. Determinar se o teste envolve a acurácia horizontal ou a vertical, ou ambas. Para a acurácia planimétrica usa-se a tabela estatística de acurácia horizontal e para a acurácia vertical, emprega-se a da acurácia vertical.
2. Selecionar um subconjunto de pontos para testar o conjunto que está sendo avaliado. Testa-se a acurácia de um conjunto de dados comparando-se as coordenadas de vários pontos nele contidos com as coordenadas dos mesmos pontos obtidas em um conjunto de dados independentes e de maior acurácia. Esses pontos de teste devem ser bem definidos e devem ser facilmente encontrados e medidos em qualquer um dos conjuntos. Recomenda o uso de vinte ou mais pontos para produzir uma avaliação estatística significativa da acurácia, independente do tamanho do conjunto de dados ou da área de cobertura.
3. Selecionar um conjunto de dados independentes e de maior acurácia correspondente ao conjunto de dados que está em teste. Esse conjunto deve ser obtido separadamente do conjunto a ser testado e deve ser o de

maior acurácia disponível. A área de cobertura desse conjunto padrão deve ser a mais próxima possível da área a quantificar.

4. Quando se coletam esses valores, é importante usar um formato numérico apropriado e similar. Emprega-se o mesmo formato numérico quando é registrada a acurácia estatística calculada.
5. Calcular a acurácia posicional. Com as coordenadas de todos os pontos determinadas, calcula-se a da acurácia, empregando as tabelas de acurácia horizontal e vertical (tabelas 01 e 02). A estatística do NSSDA é calculada a partir do registro, das informações requeridas, na tabela apropriada e calculam-se três valores: *i*) a soma da coluna das diferenças em X e Y (coordenadas do padrão menos coordenadas que estão sendo testadas) ao quadrado; *ii*) a média da soma, que é calculada dividindo a soma pelo número de pontos empregados no teste e *iii*) erro da raiz quadrada da média (RMSE) que nada mais é do que a raiz quadrada da média. A partir daí, a estatística NSSDA é determinada pelo produto do RMSE pelo valor que representa o erro padrão da média a um nível de confiança de 95% e que é igual a 1,7308 para a acurácia horizontal e 1,96 para a acurácia vertical.

Tabela 01: Tabela para o cálculo da estatística da acurácia horizontal – traduzido de Minnesota Planning (2000).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Nº pt.	Descrição ponto	X (independente)	X (teste)	Dif. em X	(Dif em X) ²	Y (independente)	Y (teste)	Dif. Em Y	(Dif. Em Y) ²	(Dif em X) ² +(Dif. em Y) ²
									soma	
									média	
									RMSE _r	
									NSSDA	

Coluna	Título	Conteúdo
A	Número do ponto	Designador do ponto de teste
B	Descrição do ponto	Descrição do ponto de teste
C	X independente	Coordenada X do ponto do conjunto de dados independente
D	X a ser testado	Coordenada X do conjunto de dados a ser testado
E	Diferença em X	$X(\text{independente}) - X(\text{teste}) = C - D$
F	E^2	Diferença em X ao quadrado
G	Y independente	Coordenada Y do ponto do conjunto de dados independente
H	Y a ser testado	Coordenada Y do conjunto de dados a ser testado
I	Diferença em Y	$Y(\text{independente}) - Y(\text{teste}) = G - H$
J	I^2	Diferença em Y ao quadrado
K	$F^2 + I^2$	Diferença em X ao quadrado, mais diferença em Y ao quadrado = (erro circular) ²
	Soma	Somatório da soma das diferenças ao quadrado em X e Y = $\sum K$
	Média	Soma / número de pontos
	RMSE _r	Raiz quadrada da média = Erro da raiz quadrada da média
	NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy statistic = 1,7308 * RMSE

Acurácia posicional: Testado para 3,35 metros de acurácia horizontal com um nível de confiança de 95%.

Acurácia posicional: Acurácia horizontal testada como 3,35 metros no nível de confiança de 95%.

Assim, um usuário desses dados pode confiar que a posição horizontal de uma feição, bem definida, estará situada na carta dentro do entorno de 3,35 m da sua posição verdadeira, e tão bem determinada como foi a posição verdadeira, 95% das vezes.

7. Incluir esse relatório na descrição completa do conjunto de dados denominada metadados. O último passo é relatar a acurácia posicional numa descrição completa do conjunto de dados. Geralmente descrito como dados de dados (metadado). O metadado descreve a qualidade, a condição, a história e outras características do conjunto de dados.

2.2.4 Normativas da acurácia do NSSDA

No apêndice 3-A da Parte 3: *National Standard for Spatial Data Accuracy*, do *Geospatial Positioning Accuracy Standards* (1998), são apresentadas as normativas para o cálculo da acurácia horizontal e vertical das cartas, conforme demonstrado a seguir :

1. Acurácia horizontal

Sabendo que:

$$RMSE_X = \sqrt{(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n} \quad (3.7)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n} \quad (3.8)$$

onde: $X_{data,i}$ e $Y_{data,i}$ são as coordenadas dos i pontos a comparar na carta, $X_{check,i}$ e $Y_{check,i}$ são as coordenadas dos i pontos de controles obtidos em uma fonte independente de maior acurácia, n é o número de pontos testados e i é um número inteiro que varia de 1 a n .

O erro horizontal no ponto i é definido como:

$$r = \sqrt{(X_{data,i} - X_{check,i})^2 + (Y_{data,i} - Y_{check,i})^2} \quad (3.9)$$

e o RMSE horizontal é:

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum(X_{data,i} - X_{check,i})^2 + \sum(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2}{n}} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2} \quad (3.10)$$

A normativa apresenta dois casos a serem usados:

Caso 1: Calcular a acurácia de acordo com o NSSDA quando $RMSE_X = RMSE_Y$

Se $RMSE_X$ for igual a $RMSE_Y$ teremos:

$$\begin{aligned} RMSE_r &= \sqrt{2MSRE_X^2} = \sqrt{2MSRE_Y^2} \\ &= 1,4142RMSE_X = 1,4142RMSE_Y \end{aligned} \quad (3.11)$$

quando se assume que os erros sistemáticos tenham sido eliminados da melhor maneira possível. Se o erro é normalmente distribuído e independente em cada uma das componentes X e Y, usa-se o fator 2,4477 para calcular a acurácia horizontal ao nível de confiança de 95% (Greenwalt *et al*, 1968). Assim quando se aplicam as condições precedentes, "Acurácia_r", o valor da acurácia em acordo com o NSSDA, será calculada pela fórmula:

$$\begin{aligned} Acurácia_r &= 2,4477RMSE_X = 2,4477RMSE_Y \\ &= 2,4477RMSE_r / 1,4142 \\ Acurácia_r &= 1,7308RMSE_r \end{aligned} \quad (3.12)$$

Caso 2: Aproximando ao erro circular padrão quando $RMSE_X \neq RMSE_Y$

Se $RMSE_{min}/RMSE_{max}$ é um valor compreendido entre 0,6 e 1 (onde $RMSE_{min}$ é o menor valor entre $RMSE_X$ e $RMSE_Y$, e $RMSE_{max}$ é o maior), o erro padrão circular (a 39,35% de confiança) pode ser aproximado a $0,5(RMSE_X + RMSE_Y)$ segundo Greenwalt *et al* (1968). Se o erro é normalmente distribuído e independente em cada uma das componentes X e Y, o valor da acurácia em acordo com o NSSDA pode ser aproximado calculado pela seguinte fórmula:

$$Acurácia_r \cong 2,4477 \times 0,5 \times (RMSE_x + RMSE_y) \quad (3.13)$$

2. Acurácia vertical

Sendo:

$$RMSE_Z = \sqrt{(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n} \quad (3.14)$$

onde:

$Z_{data,i}$ é a coordenada vertical dos i pontos a comparar na carta, $Z_{check,i}$ é a coordenada vertical dos i pontos de controles obtidos na fonte independente de alta acurácia, n é o número de pontos testados e i é um número inteiro que varia de 1 a n .

Aqui, também se assume que os erros sistemáticos tenham sido eliminados da maneira melhor possível. Se o erro vertical é normalmente distribuído, usa-se o fator 1,9600 para calcular o erro linear vertical ao nível de confiança de 95% (Greenwalt *et al*, 1968). Portanto, a acurácia vertical, “Acuracia_z” relatada em acordo com o NSSDA será calculada pela seguinte equação:

$$Acurácia_z = 1,9600 RMSE_Z \quad (3.15)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local

O levantamento de campo foi realizado em uma área rural situada no 3º Distrito de Pains, no Município de Santa Maria. A área escolhida tem relevo suavemente ondulado, com cobertura vegetal rasteira o que permite amplo ângulo de rastreamento de sinais de satélites GPS. A distância média entre a área e a estação SMAR da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) (Santa Maria-RS) é de aproximadamente 1600 metros. Na figura 04 se apresenta um croqui da área levantada e da sua situação em relação à Estação SMAR da RBMC. Na figura 05 é representada a área do levantamento em relação ao Campus da Universidade Federal de Santa Maria/RS.

3.2 Materiais

Para o levantamento dos pontos em coordenadas geodésicas foi empregado o receptor modelo Hiper GGD da TOPCON cujas características básicas são: i) recepção de sinais GPS L1 e L2; ii) nos métodos relativos estático ou rápido estático a precisão horizontal é de $3\text{mm} + 0.5\text{ppm}$ e a vertical é de $5\text{mm} + 0.5\text{ppm}$.

Para o levantamento topográfico dos mesmos pontos usou-se uma estação total modelo Leica TPS 805 da LEICA. Características do equipamento: i) para medição angular no método absoluto contínuo apresenta resolução de $1''$ e desvio padrão de $5''$; para medição de distâncias com prisma, o desvio padrão é de $5\text{ mm} + 2\text{ ppm}$.

No processamento dos dados de GPS empregou-se o programa computacional Topcon Tolls, versão V.6.1 fornecido pelo fabricante do equipamento e para os dados obtidos com a estação total o programa computacional Posição. A transformação de coordenadas foi efetuada com o emprego do programa

computacional Transgeolocal (Dal'Forno, *et al*, 2008) que tem como fundamento matemático as transformações exposta na seção 2.4. A tabulação dos dados e suas estatísticas foram realizadas no programa computacional Excel e a apresentação gráfica dos levantamentos planialtimétricos gerados, no programa computacional AutoCAD.

Como estação base para o processamento relativo empregou-se a estação SMAR.

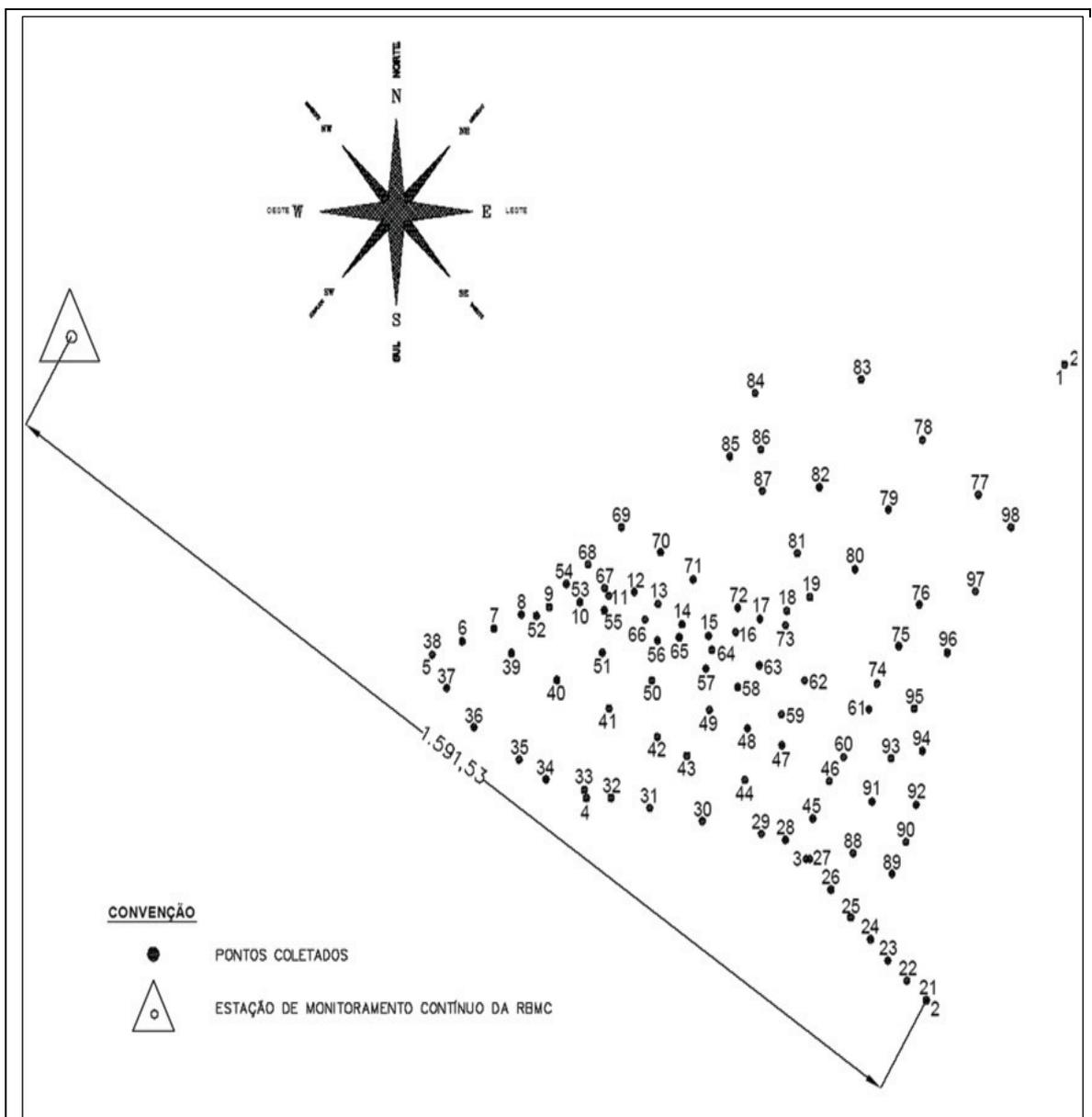


Figura 04: Croqui da área levantada mostrando os pontos e a Estação SMAR da RBMC em escala aproximada.
Org: SAMPAIO, M.I.R, novembro de 2010.



Figura 05: Imagem do google earth que mostra o posicionamento da área de estudo em relação ao Campus da UFSM
Org: SAMPAIO, M. I.R., novembro de 2010

Na figura 06 apresentam-se os instrumentos utilizados para a realização do levantamento geodésico e topográfico.

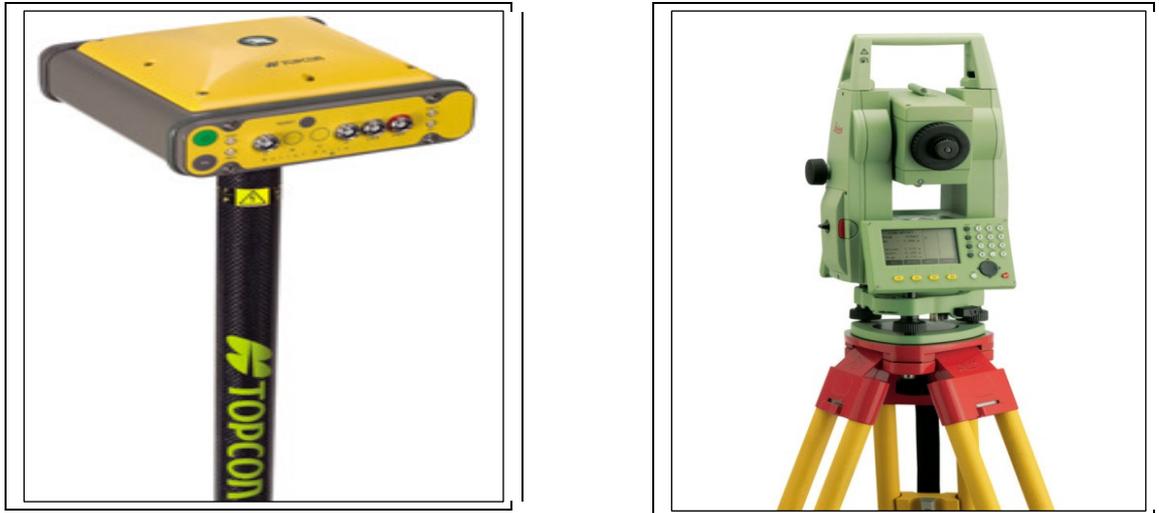


Figura 06: Imagens do GPS Hiper GGD da TOPCON e da estação total modelo TPS 805 da LEICA
Org: SAMPAIO, M. I. R.

3.3 Métodos

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

Na primeira, sobre a área escolhida foram selecionados, materializados e sinalizados cinco pontos que serviram como limites da área a ser levantada. Escolheram-se ainda quatorze pontos definidos em função do relevo da área, e que foram aproveitados posteriormente para a geração de um MDT quando associados a mais pontos. Todos foram ocupados e levantados segundo os dois métodos de levantamento que foram empregados: *i)* o método geodésico caracterizado pelo emprego do receptor GPS Hiper, no método relativo e *ii)* o método topográfico de coordenadas polares (irradiação), com o emprego da estação Leica TPS 805.

Os cinco pontos considerados vértices da área foram rastreados no método relativo estático com o emprego de bipé para a instalação do equipamento receptor. Para o levantamento topográfico o prisma também foi utilizado em bipé. Os demais quatorze pontos foram rastreados no método dinâmico “*stop and go*” com o equipamento apoiado em bastão e quando do emprego da estação total usou-se o mesmo sistema de apoio para o prisma.

A fim de se determinar um tempo mínimo adequado de rastreamento e uma taxa de coleta de dados empregaram-se os seguintes tempos e taxas de rastreamento: *i*) nos pontos considerados vértices (cinco primeiros pontos da tabela 1) 10 minutos de rastreamento e taxa de 5 segundos; *ii*) nos dez pontos seguintes da tabela 1: tempo de 30 segundos de rastreamento e taxa de 5 segundos; *iii*) nos últimos quatro pontos: tempo maior do que 15 segundos e menor do que 30 segundos de rastreamento e taxa de 5 segundos.

Com o auxílio do programa computacional Transgeolocal as coordenadas geodésicas obtidas no levantamento com receptor GPS foram transformadas para o plano topográfico local (sistema geodésico local) e as coordenadas topográficas obtidas no levantamento topográfico foram reorientadas de maneira a assumirem os mesmos azimutes geodésicos obtidos na transformação anterior. Os resultados, assim obtidos, quando comparados permitem verificar se as coordenadas dos demais pontos, necessários para o levantamento planialtimétrico, poderiam ser obtidos com precisão e acurácia adequadas usando um tempo de coleta maior do que 15 segundos e menor do que 30 segundos e taxa de 1 segundo.

Na segunda etapa foram tomadas medidas de mais 82 pontos seguindo o especificado, no parágrafo anterior na primeira etapa, no que se refere ao tempo de rastreamento e a taxa de coleta. Nos resultados foram analisadas as ambigüidades e verificada a magnitude dos RMS (*root mean-square*) obtidos no processamento, para aceitação ou rejeição do ponto.

Os pontos com RMS considerados aceitáveis, para os fins propostos, receberam o mesmo tratamento metodológico dado aos anteriormente levantados na primeira fase. Calcularam-se as discrepâncias entre as coordenadas (t , u , v) obtidas com a estação total e as obtidas com GPS (o levantamento com a estação total foi considerado como referência), bem como a discrepância total no plano horizontal (t , u).

Para que seja possível estabelecer a precisão e acurácia das coordenadas obtidas, as discrepâncias total no plano horizontal (t,u) e as discrepâncias em altura geodésica (v) foram tratadas segundo a metodologia estabelecida no Decreto 89.817/84 - Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (1984) empregando a metodologia estatística sugerida por Merchant (1982).

Como segunda opção de medida de qualidade das coordenadas empregaram-se os padrões norte americanos definidos pelo "*National Standard for*

Spatial Data Accuracy” (NSSDA) e destinados a medir e descrever a qualidade de dados geográficos. Tais padrões são encontrados no “*Positional Accuracy Handbook*” editado por *Minnesota Planning, Land Management Information Center* (2000) e no “*Geospatial Positioning Accuracy Standards – Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*”.e também pela proposta do “*National Standard for Spatial Data Accuracy*” (NSSDA) (1999).

Com o emprego do programa computacional Posição foram gerados os respectivos MDT e posteriormente desenhados com o programa computacional AutoCAD.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As coordenadas geodésicas dos dezenove pontos levantados, na primeira etapa, a partir de observações GPS apresentaram ambigüidade fixa e RMS inferiores a 0,01 m para os 15 primeiros pontos da tabela 1 e inferiores a 0,012 m para os demais. Essas coordenadas foram transformadas com o programa Transgeolocal, para coordenadas topográficas e quando comparadas com as obtidas pelo levantamento topográfico, apresentaram as discrepâncias constantes na tabela 03:

Tabela 03: Discrepância entre as coordenadas topográficas e as coordenadas topográficas transformadas a partir do GPS. Tempo e taxa de rastreamento. – 19 pontos da primeira etapa.

Pontos	Discr. em t (m)	Discr. em u (m)	Discr. em v (m)	Discr. em tu (m)	Tempo de rastreamento h:m:s	Taxa de coleta
1	0,000	0,000	0,000	0,000	00:10:55	5"
2	0,000	-0,001	0,001	0,001	00:10:20	5"
3	-0,019	0,022	0,029	0,029	00:10:10	5"
4	-0,011	0,009	0,015	0,015	00:09:50	5"
5	-0,013	0,030	0,032	0,032	00:12:35	5"
6	-0,021	0,023	0,031	0,031	00:00:30	5"
7	0,057	-0,127	0,139	0,139	00:00:40	5"
8	-0,010	0,028	0,030	0,030	00:00:40	5"
9	-0,010	0,025	0,027	0,027	00:00:40	5"
10	-0,036	0,036	0,051	0,051	00:00:40	5"
11	-0,024	0,044	0,050	0,050	00:00:35	5"
12	-0,011	0,005	0,012	0,012	00:00:35	5"
13	-0,032	0,030	0,044	0,044	00:00:35	5"
14	-0,018	0,032	0,037	0,037	00:00:35	5"
15	-0,005	0,014	0,014	0,014	00:00:45	5"
16	-0,027	0,030	0,040	0,040	00:00:15	5"
17	-0,016	0,009	0,018	0,018	00:00:15	5"
18	-0,017	0,019	0,026	0,026	00:00:15	5"
19	-0,023	0,025	0,034	0,034	00:00:15	5"
Média *	0,012	0,027	0,033	0,033		
S *	0,019	0,027	0,029	0,029		

* as médias e os desvios padrões foram calculados com os valores absolutos das discrepâncias.

Como pode ser visto, na tabela 03, as discrepâncias individualmente em todos os eixos e a discrepância total no plano horizontal apresentam variações, na sua quase totalidade, na ordem do centímetro para qualquer um dos tempos testados. Essa constância e dimensão dos resultados conduziu a optar por testar,

como tempo mínimo de coleta, um tempo maior do que 15 segundos e menor do que 30 segundos e taxa de 1 segundo.

Dos 82 pontos levantados, na segunda etapa, aproveitou-se 80 pontos. O processamento desses dados apresentou ambigüidade fixa para todos os pontos. No entanto, como o processamento envolveu uma única época, os resultados obtidos foram analisados para verificar a presença de altos RMS, o que implica em baixas precisões. Assim, foram eliminados dois pontos que apresentaram RMS superiores ao metro (1,832 e 3,636 m). Os demais pontos apresentaram RMS inferior a 0,40 m, com grande predominância de valores inferiores a 0,10 m. Os 80 pontos tiveram as discrepâncias que estão apresentadas na tabela 04.

Calcularam-se as médias e os desvios padrões com o uso dos valores absolutos das discrepâncias, uma vez que, é de interesse somente as suas grandezas e não os seus sentidos.

Tabela 04: Discrepância entre as coordenadas topográficas e as coordenadas topográficas transformadas a partir do GPS. Tempo e taxa de rastreamento. – 80 pontos da segunda etapa.

Pontos	Discr. em t (m)	Discr. em u (m)	Discr. em v (m)	Discr. em tu (m)	Tempo de rastreamento h:m:s	Taxa de coleta
1	0,000	0,000	0,000	0,000	00:02:35	1"
2	0,006	0,000	-0,040	0,006	00:02:15	1"
3	0,085	0,031	-0,203	0,090	00:00:20	1"
4	-0,022	0,005	-0,034	0,023	00:00:28	1"
5	0,017	-0,017	-0,042	0,024	00:00:18	1"
6	-0,027	-0,034	-0,027	0,043	00:00:20	1"
7	-0,008	-0,030	-0,049	0,031	00:00:21	1"
8	-0,028	-0,025	-0,048	0,037	00:00:25	1"
9	-0,165	-0,270	-0,319	0,317	00:00:22	1"
10	0,063	-0,098	-0,590	0,116	00:00:21	1"
11	-0,005	-0,061	-0,072	0,061	00:00:23	1"
12	-1,277	-0,185	1,855	1,290	00:00:20	1"
13	-0,020	-0,029	-0,075	0,035	00:00:17	1"
14	-0,027	-0,008	-0,017	0,028	00:00:17	1"
15	-0,032	0,003	-0,029	0,032	00:00:20	1"
16	0,009	-0,009	-0,029	0,012	00:00:19	1"
17	-0,019	-0,013	-0,060	0,023	00:00:19	1"
18	-0,050	-0,001	-0,073	0,050	00:00:19	1"
19	0,013	0,537	-0,160	0,537	00:00:20	1"
20	-0,035	-0,001	-0,093	0,035	00:00:19	1"
21	0,018	0,008	-0,044	0,020	00:00:24	1"
22	-0,053	-0,022	-0,085	0,057	00:00:20	1"

Continuação

Pontos	Discr. em t (m)	Discr. em u (m)	Discr. em v (m)	Discr. em tu (m)	Tempo de rastreo h:m:s	Taxa de coleta
23	-0,114	0,037	-0,055	0,120	00:00:17	1"
24	-0,034	-0,022	-0,056	0,040	00:00:20	1"
25	-0,001	-0,028	-0,045	0,028	00:00:18	1"
26	-0,043	-0,023	-0,056	0,048	00:00:19	1"
27	0,187	-0,002	-0,480	0,187	00:00:21	1"
28	-0,047	-0,036	-0,044	0,059	00:00:20	1"
29	-0,057	-0,027	-0,070	0,063	00:00:21	1"
30	0,171	0,018	-0,515	0,172	00:00:21	1"
31	-0,057	-0,051	-0,077	0,076	00:00:23	1"
32	-0,046	0,005	-0,053	0,046	00:00:24	1"
33	-0,043	-0,039	-0,086	0,058	00:00:20	1"
34	-0,041	0,005	-0,057	0,041	00:00:21	1"
35	-0,047	0,018	-0,052	0,050	00:00:22	1"
36	-0,043	0,006	-0,068	0,043	00:00:23	1"
37	-0,013	0,032	-0,084	0,035	00:00:25	1"
38	-0,098	-0,033	-0,049	0,103	00:00:25	1"
39	-0,033	-0,334	0,076	0,336	00:00:23	1"
40	-0,318	-0,444	-1,591	0,546	00:00:22	1"
41	-0,527	0,370	0,700	0,643	00:00:20	1"
42	-0,038	-0,029	0,005	0,048	00:00:20	1"
43	-0,082	-0,032	-0,050	0,088	00:00:20	1"
44	-0,070	-0,010	-0,053	0,071	00:00:20	1"
45	-0,067	0,025	-0,052	0,072	00:00:21	1"
46	-0,057	0,019	-0,053	0,060	00:00:20	1"
47	-0,085	0,041	-0,063	0,094	00:00:20	1"
48	-0,086	0,127	-0,064	0,153	00:00:23	1"
49	0,059	0,185	0,350	0,194	00:00:21	1"
50	-0,110	-0,021	-0,070	0,112	00:00:21	1"
51	-0,021	0,284	0,111	0,285	00:00:22	1"
52	-0,139	-0,392	-0,274	0,416	00:00:21	1"
53	-0,032	-0,113	0,038	0,118	00:00:23	1"
54	-0,069	-0,019	0,001	0,072	00:00:21	1"
55	-0,229	0,057	0,489	0,236	00:00:22	1"
56	-0,036	-0,041	-0,088	0,054	00:00:21	1"
57	-0,131	-0,057	0,862	0,143	00:00:21	1"
58	-0,147	1,004	1,140	1,015	00:00:23	1"
59	-0,142	0,966	1,173	0,976	00:00:22	1"
60	0,030	-1,263	-1,479	1,264	00:00:20	1"
61	-0,085	-0,015	-0,081	0,086	00:00:25	1"
62	-0,088	-0,007	-0,081	0,089	00:00:22	1"
63	-0,061	0,033	-0,058	0,069	00:00:18	1"
64	-0,079	0,227	-0,090	0,240	00:00:20	1"
65	-0,025	0,032	0,000	0,041	00:00:21	1"
66	-0,064	0,057	0,000	0,086	00:00:20	1"
67	-0,049	0,340	0,000	0,344	00:00:20	1"
68	-0,106	0,040	-0,021	0,113	00:00:23	1"

Continuação

Pontos	Discr. em t (m)	Discr. em u (m)	Discr. em v (m)	Discr. em tu (m)	Tempo de rastreo h:m:s	Taxa de coleta
69	-0,085	-0,003	-0,049	0,085	00:00:18	1"
70	0,062	0,156	0,238	0,168	00:00:20	1"
71	-0,056	0,005	-0,045	0,057	00:00:21	1"
72	-0,053	0,008	-0,039	0,054	00:00:20	1"
73	-0,056	0,020	-0,039	0,060	00:00:22	1"
74	-0,087	0,023	-0,035	0,090	00:00:22	1"
75	-0,040	0,013	-0,043	0,042	00:00:17	1"
76	-0,002	-0,003	-0,023	0,004	00:00:19	1"
77	0,015	0,002	-0,017	0,015	00:00:19	1"
78	-0,013	-0,003	-0,006	0,013	00:00:19	1"
79	-0,033	0,032	-0,049	0,046	00:00:20	1"
80	0,030	-0,040	-0,020	0,050	00:00:19	1"
Media *	0,081	0,117	0,194	0,160		
S *	0,155	0,260	0,369	0,259		

* as médias e desvios padrões foram calculados com os valores absolutos das discrepâncias.

Na tabela 04 e nas figuras 07, 08, 09 e 10 observa-se que ao diminuir-se o tempo de rastreo as grandezas das discrepâncias não tiveram o mesmo comportamento das obtidas na primeira etapa (na ordem do centímetro), apresentando 20% dos resultados com valor superior a 0,15 m e em aproximadamente 4% dos casos o valor foi superior a 1,00 m. A partir destas constatações, verifica-se que, não existe confiabilidade de acurácia nos resultados obtidos com o tempo de rastreo escolhido como mínimo, quando se deseja precisão e exatidão para geração de MDT em escala grande.

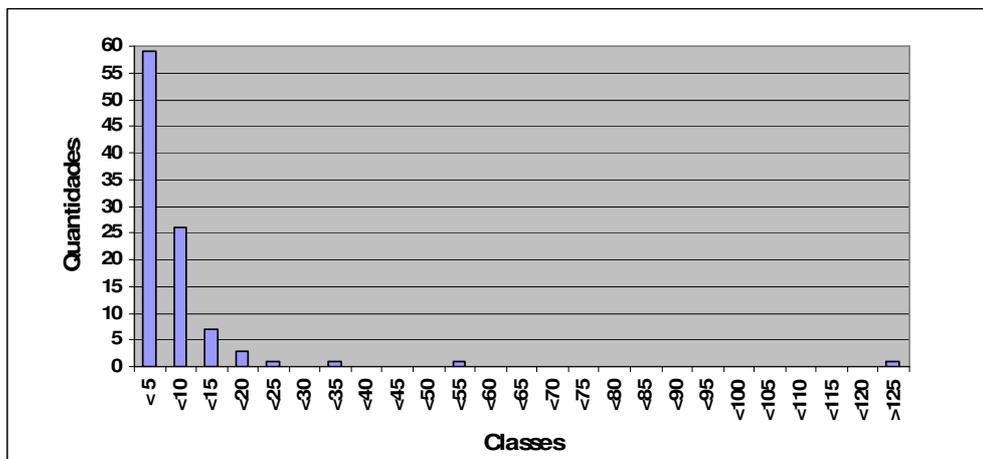


Figura 07: Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo t (classes de 5 cm).
 Todos os 99 pontos.
 Org: SAMPAIO, M.I.R.

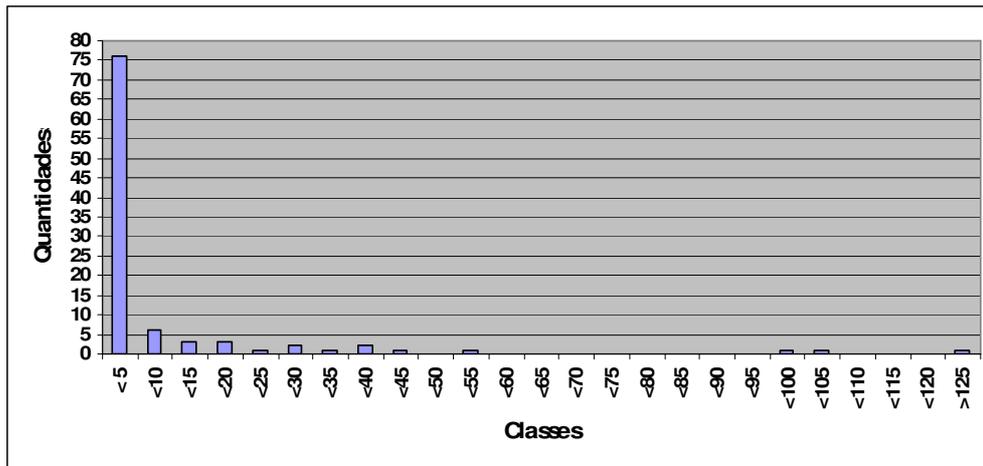


Figura 08: Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo u (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.
Org: SAMPAIO, M.I.R

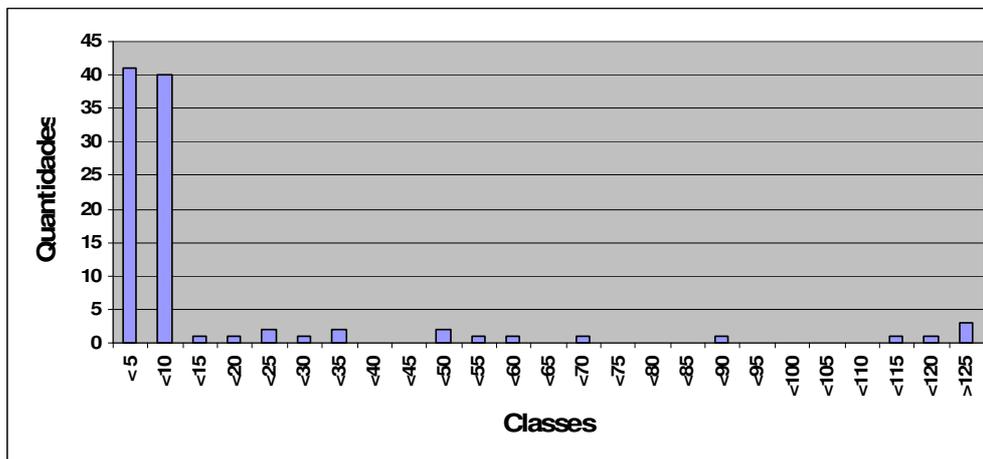


Figura 09: Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo v (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.
Org: SAMPAIO, M. I, R

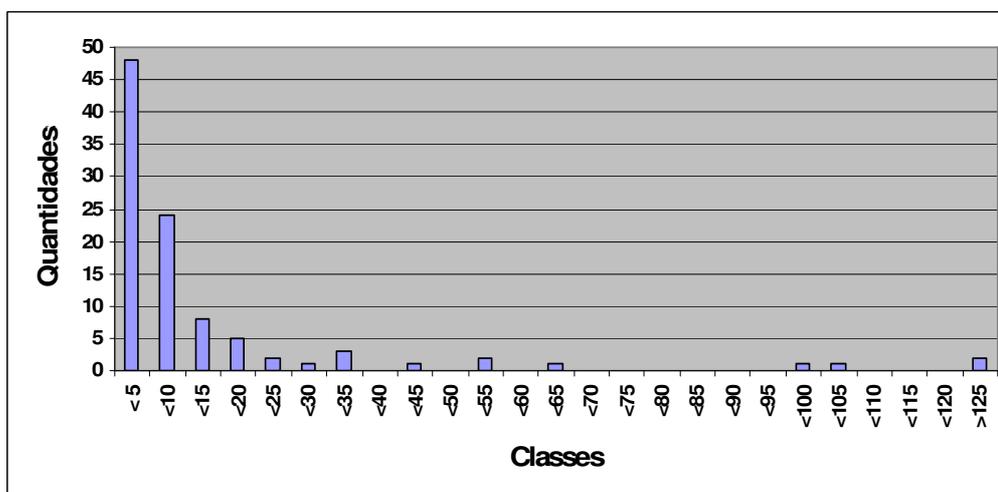


Figura 10: Distribuição de frequências da discrepância total no plano horizontal (t, u) (classes de 5 cm). Todos os 99 pontos.
Org: SAMPAIO, M. I.R

No entanto, essa constatação, por si só, não serve como um indicativo seguro da qualidade dos dados obtidos quando se deseja usá-los para representações em plantas, onde escalas de redução são empregadas. Para tanto, as discrepâncias obtidas foram submetidas às metodologias propostas no capítulo 2 , item 2.5.

4.1 Resultados obtidos e o Decreto 89.817/84

Empregando a metodologia proposta por Merchant (1982) foram obtidos os resultados para as médias e os desvios padrões das discrepâncias que são apresentados na tabela 05.

Tabela 05: Médias e desvios padrões das discrepâncias obtidas com os 99 pontos.

Parâmetro estatístico	Discrepância em t (m)	Discrepância em u (m)	Discrepância em v (m)	Discrepância em tu (m)
média	-0,059	0,011	-0,024	0,136
s	0,148	0,224	0,375	0,239

Teste de tendência para a verificação da presença de erros sistemáticos (Test de Student ao nível de 90%):

$$|t_t| \leq t_{(n-1; \alpha/2)} \quad t_t = 3,604 > 1,651$$

$$|t_u| \leq t_{(n-1; \alpha/2)} \quad t_u = 0,507 < 1,651$$

$$|t_v| \leq t_{(n-1; \alpha/2)} \quad t_v = 0,639 < 1,651$$

As discrepâncias obtidas no eixo t e, conseqüentemente, a discrepância total horizontal contêm erros sistemáticos que devem ser identificados e corrigidos.

Prosseguindo com a metodologia (desconsiderando a presença desses erros sistemáticos em função de suas baixas significâncias) e aplicando o teste do Qui-quadrado que compara o desvio padrão das discrepâncias amostrais (s) com os valores estabelecidos no Decreto 89.817/84 para o erro padrão esperado (EP = σ) de cada classe, é possível verificar para qual escala de carta ou planta, os resultados obtidos satisfazem a exatidão.

Os valores do EP e do PEC para as três classes estabelecidas pelo Decreto 89.817/84 para a escala 1:1.000 são apresentadas na tabela 06.

Tabela 06: Valores de EP e PEC para cartas na Esc. 1:1.000.

Cartas Esc.:1:1.000	EP Δ tu (m)	EP Δ t (m)	EP Δ u (m)	PEC Δ tu (m)	PEC Δ t (m)	PEC Δ u (m)
Classe A	0,30	0,21	0,,21	0,50	0,35	0,35
Classe B	0,50	0,35	0,35	0,80	0,57	0,57
Classe C	0,60	0,42	0,42	1,00	0,71	0,71

Aplicando o Teste do Qui-quadrado, deve-se ter que: $\Pi^2_{98, 0,10} > \Pi^2_{t, n-1}$ e $\Pi^2_{98, 0,10} > \Pi^2_{u, n-1}$, usando a tabela do teste resulta $\Pi^2_{98, 0,10} = 116,31$.

A tabela 07 mostra os valores obtidos no teste do Qui-quadrado para os valores de s e de EP para a escala 1:1000.

Tabela 07: Valores de $\Pi^2_{t, n-1}$, $\Pi^2_{u, n-1}$, e $\Pi^2_{tu, n-1}$ para as diversas classes (Escala1:1.000).

Classe	$\Pi^2_{t, n-1}$	$\Pi^2_{u, n-1}$	$\Pi^2_{tu, n-1}$	$\Pi^2_{v, n-1}$
A	47,94	91,11	123,88	123,94
B	17,26	39,49	44,60	86,07
C	11,98	27,42	30,97	55,08

Comparando os valores obtidos para $\Pi^2_{t, n-1}$, $\Pi^2_{u, n-1}$, e $\Pi^2_{tu, n-1}$ com o $\Pi^2_{98, 0,10}$ conclui-se que os resultados para as coordenadas t e u (planimétricas) são precisos para representações em escala 1:1000 das Classes B e C. Consequentemente são precisos também para escalas menores do que esta em qualquer uma das classes. Quanto à precisão vertical, essa é satisfeita para espaçamento de curvas de metro em metro, para as classes B e C.

4.2 Resultados e o NSSDA

Aplicando as especificações estabelecidas pelo NSSDA para o cálculo da exatidão horizontal e da exatidão vertical, para a totalidade dos dados obtidos nas duas etapas, pode-se concluir, usando a forma correta de informar a acurácia posicional, que:

Ao nível de confiança de 95% existe uma acurácia horizontal de 0,473 m e um RMSE das discrepâncias de 0,273 m.

Ao nível de confiança de 95% existe uma acurácia vertical de 0,733 m e um RMSE das discrepâncias verticais de 0,374 m.

Se for considerada uma resolução de 0,2 mm seria permitido o emprego dos resultados, aqui obtidos, para a construção de cartas ou plantas em escalas inferiores a 1:2.365 e seria razoável traçados de curvas de nível eqüidistantes de 1,50 m.

Empregando a mesma especificação, somente para os dados obtidos na primeira etapa, pode-se concluir, que:

Ao nível de confiança de 95% existe uma acurácia horizontal de 0,076 m e um RMS das discrepâncias de 0,044 m.

Ao nível de confiança de 95% existe uma acurácia vertical de 0,111 m e um RMSE das discrepâncias verticais de 0,056 m.

Se for considerada uma resolução de 0,2 mm seria permitido o emprego dos resultados, aqui obtidos, para a construção de cartas ou plantas em escalas inferiores a 1:380 e seria razoável traçados de curvas de nível eqüidistantes de 0,25 m.

Na figura 11 estão representadas as curvas de nível espaçadas de metro em metro geradas a partir dos dois MDT gerados. Nessa figura é possível observar as diferenças no traçado de algumas curvas de nível de mesma altura elipsoidal e que foram causadas pelas discrepâncias encontradas entre as medidas efetuadas pelos dois métodos de levantamento testados. No entanto, a figura 11 mostra que ambos MDT representam morfologia do terreno semelhante.

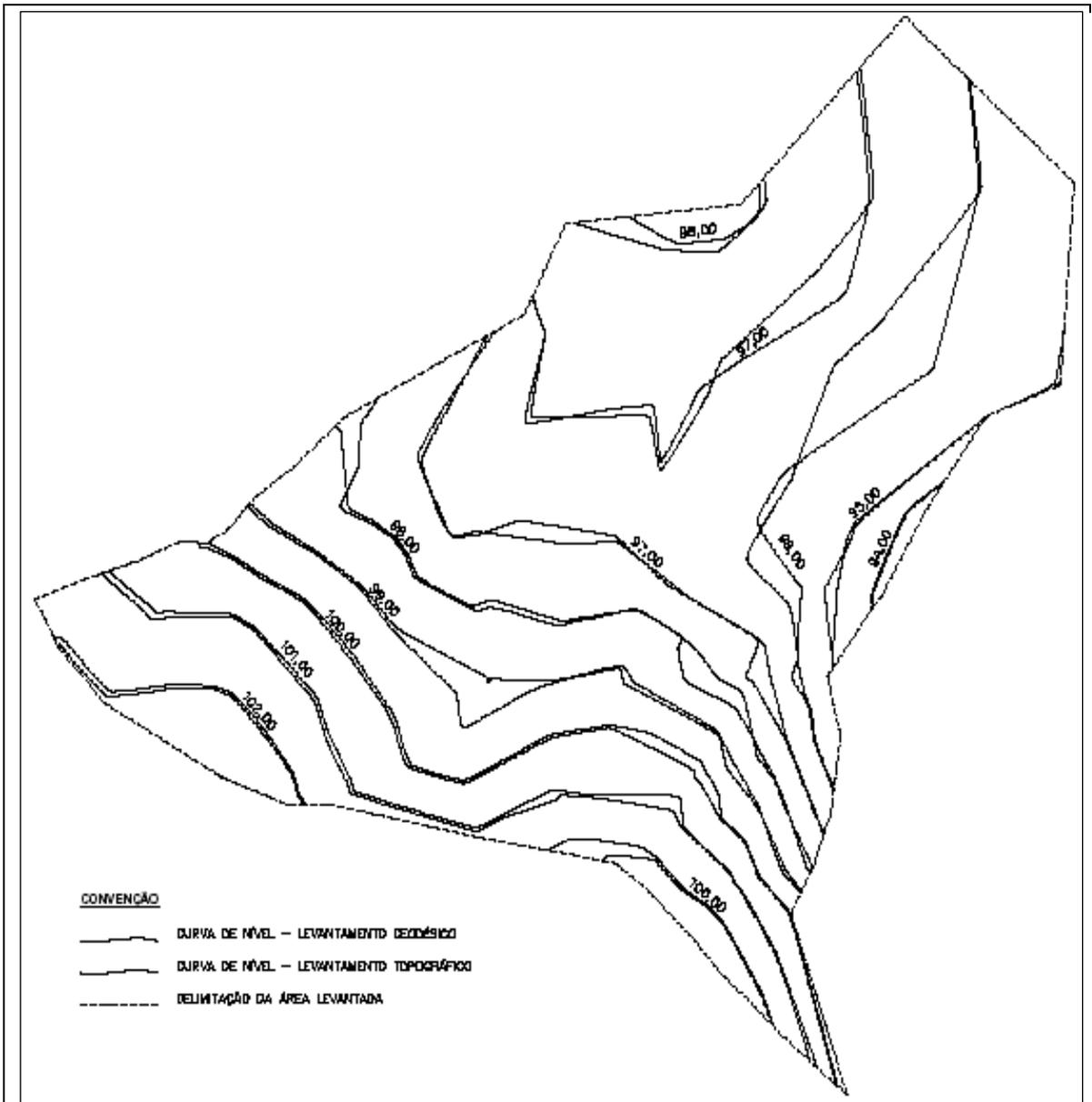


Figura 11: Figura representativa das curvas de nível e suas discrepâncias, obtidas a partir dos dois modelos digitais do terreno (MDT).
Org: SAMPAIO, M. I, R.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O emprego de equipamento GPS de dupla frequência no método relativo dinâmico, a um raio médio de 1.600 metros da estação base, com tempo e rastreo maior do que 15 segundos e menor do que 30 segundos, em uma taxa de rastreo de 1 segundo, mostra-se adequado para a geração de MDT em coordenadas geodésicas locais quando o mesmo for gerado em escala igual ou inferior a 1:1.000 com curvas de nível espaçadas de metro em metro (classes B e C do Decreto 89.817/84). Ou ainda, atendendo ao NSSDA, que é mais conservador, poder-se-á produzir plantas em escalas iguais ou inferiores a 1:2.500 com curvas de nível espaçadas a cada 1,50 m.

É esperado, conforme demonstram os dados produzidos na primeira etapa deste trabalho, que com tempo de rastreo igual ou superior a 30 segundos, nas mesmas condições, obtenha-se um resultado mais acurado que permita a produção de MDT em escalas maiores e mais apropriadas aos projetos de engenharia.

O método testado, também, mostra-se adequado, rápido e econômico para trabalhos em áreas grandes e com baixa densidade de vegetação de grande porte.

Algumas recomendações, em função dos resultados obtidos, devem ser feitas: *i)* repetir o experimento usando tempo de rastreo maior do que 30 segundos, com taxa de 1 segundo; *ii)* Usar distâncias maiores entre a estação base e a área levantada, a fim de calibrar o melhor tempo de rastreo; *iii)* testar o método empregando equipamentos de uma frequência e *iv)* fazer o levantamento usando dois equipamentos de dupla frequência na área, um como base e outro no método dinâmico, mas ambos com taxa de rastreo de 1".

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. Curitiba, SBEE, 1998. 258p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.166 – Rede de referência cadastral municipal – Procedimento**. Rio de Janeiro, 23 p. 1998.

BRASIL, **Decreto nº 89.817 de 20/06/84 – Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Brasília, Diário Oficial da União, 1984.

DAL'FORNO, G. L.; ANTONIAZZI, R. L.; STRIEDER, A. J.; AGUIRRE, A. J. **Programa computacional para transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas locais e o processo inverso. A MIRA – Agrimensura e Cartografia**. Criciúma, Santa Catarina, p. 79-80. Ago. 2008.

DAL'FORNO, G. L.; ANTONIAZZI, R. L.; STRIEDER, A.J.; AGUIRRE, A. J.. **Programa computacional para la Transformación de Coordenadas Geodésicas Geocéntricas en Coordenadas Topográficas Locales y el Proceso Inverso**. In: X congreso Argentino y VII Latinoamericano de Agrimensura, 2008, Santa Fé. Anais Digital del X congreso Argentino y VII Latinoamericano de Agrimensura, 2008.

DAL'FORNO G. L.; STRIEDER, A. J. **SIG – Precisão, acurácia, resolução e qualidade**. Livro no prelo. 215 p. 2010.

GAMAEL, C.. **Referenciais Cartesianos utilizados em Geodésia**. Curitiba. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR. 1981.

GREENWALT, C.R.; SCHULTZ, M.E.1968, **Principles and Error Theory and Cartographic Applications**, ACIC Technical Report No. 96: St. Louis, Mo., Aeronautical Chart and Information Center, U.S. Air Force, 89 p., 1968.

JEKELI, C. **Geometric Reference Systems**. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Ciencias. Ohio State University, 2006. 195 p.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. John Wiley & Sons, Toronto, Canadá. 1990.

MERCHANT, D. C. **Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps, Technical Papers** on the American Congress on Surveying and Mapping (1), 222-231. 1982.

MINNESOTA PLANNING, LAND MANAGEMENT INFORMATION CENTER. **Positional Accuracy Handbook – Using the National Standard for Spatial Data Accuracy of measure and report geographic data quality**. 2000. Acessado em janeiro de 2009. www.mnplan.state.mn.us/pdf/1999/lmic/nssda_o.pdf.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS – Descrição, Fundamentos e Aplicações**. Fundação Editora UNESP, São Paulo. 2ª edição, 2008. 480 p.

NATIONAL SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE, **Geospatial Positioning Accuracy Standads – Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy**, on-line, <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-accuracy/part3/chapter3>. 1998. Acessado em 05/01/2009.

NEWTON, I.. ***Philosophiae naturalis principia Mathematica***. London, Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater. Prostat Venales apud Sam. Smith ad insignia Principis Walliae in Coemiterio D. Pauli, aliosq, nonnullos Bibliopolas 1687 ,538 p.

SCRIBD **Geometria del Elipsoide de Revolucion**. 47 pg. 2008. in <http://www.scribd.com/doc/5301531/GEOMETRIA-DEL-ELIPSOIDE-DE-REVOLUCION>. Acessado em 10/08/2009.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Berlin-New York. De Gruyter, 589 p. 2003.

TORGE,W.. **Geodesy**. 3ª Edição, Walter de Gruyter. Berlim. 416 p. 2001.

ZANETTI, M. A. Z. **Geodésia**. Universidade Federal do Paraná. Apostila. 95 p. 2007. in <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/geodesia/apostila.pdf>. Acessado em 10/08/2009.