

Levantamento planialtimétrico no plano topográfico local: estudo comparativo dos resultados obtidos a partir de métodos geodésicos e topográficos

Gelson Lauro Dalforno, Marco Ivan Rodrigues Sampaio, Argentino José Aguirre, Fernando Luiz Hillebrand

Programa de Pós-Graduação em Geomática, UFSM, Av. Roraima, 1000, 97105-900 Santa Maria, RS, Brasil. gelforno@smail.ufsm.br, sammarco18@hotmail.com, ajaguirr@smail.ufsm.br, fernando2002@yahoo.com.br

RESUMO

O surgimento da geodésia por satélites revolucionou os levantamentos geodésicos. No entanto, a transformação 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 compatível à aplicação. O objetivo deste trabalho foi 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 estudo comparativo 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 1:1.000 ou menores, e com curvas de nível com equidistância de um metro conforme o estabelecido pelo Decreto 89.817/84, ou a escala 1:2.500, com curvas de nível espaçadas de metro e meio, quando referidas as especificações do NSSDA.

Palavras-chave: coordenadas geodésicas, coordenadas locais, plano topográfico.

ABSTRACT

PLANIALTIMETRIC SURVEY ON THE LOCAL TOPOGRAPHIC PLAN: COMPARATIVE STUDY OF THE RESULTS OBTAINED FROM GEODETIC AND TOPOGRAPHIC METHODS. The appearance of geodesy through satellites revolutionized the geodesic survey. However, the transformation of the results obtained in surveys of local topographic planes, using the traditional methodology, presents operational problems. A method, 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 classes B and C, in a scale of 1:1000 or less, as well as with level curves with equidistance 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 at one meter and a half, when these refer to specifications of NSSDA.

Key words: geodetic coordinates, local terrestrial coordinates, local geodetic system.

INTRODUÇÃO

Os profissionais que exercem suas atividades na área de geoprocessamento se defrontam constantemente com problemas relacionados 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, que expressam seus resultados em diferentes referenciais.

Tal situação é bem característica em levantamentos de pontos da superfície terrestre quando se empregam, de modo isolado, concomitante, ou integrado, receptores de sinais *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e os taqueôme-

tros eletrônicos, comumente denominados de estações totais, quando se deseja estabelecer 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 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 se usam para a definição dos pontos os equipamentos taqueômetros eletrônicos, as coordenadas obtidas estão referidas a um Plano Topográfico Local estabelecido na altitude ortométrica do ponto origem do levantamento, ou a uma altura arbitrária denominada de cota.

Desse fato resulta que um mesmo ponto, georreferenciado pelos dois métodos, apresenta resultados diversos, dada a sua não vinculação a um mesmo sistema de referência. No primeiro caso, as distâncias e os ângulos obtidos estão sobre o elipsoide de referência e são elementos curvilíneos, enquanto no método topográfico, os mesmos elementos são retas e ângulos planos medidos sobre o referencial (Plano Topográfico Local). Entendido isso, fica claro que, para serem compatibilizados esses levantamentos, é necessária a transformação dos resultados obtidos para um único sistema de referência.

Fórmulas são empregadas quando se deseja que as medidas efetuadas por processos topográficos sejam posteriormente transformadas em geodésicas. Entre estas, merecem citação, pelo seu uso frequente, a de Puissant (Zanetti, 2007, p. 76) e a de Sodano (Scribd, 2008, p. 41). Essas transformações, na prática, são chamadas de transporte de coordenadas, mediante a aplicação do problema direto.

No Brasil, a transformação de coordenadas geodésicas para o Sistema Topográfico Local é regulamentada pela Norma Brasileira 14166:1998, que estabelece a aplicação do formulário de Puissant para o denominado problema inverso.

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. Dado que a NBR 14166:1998 estabelece que o limite máximo para a diferença de nível entre o plano topográfico local e qualquer ponto projetado seja de 150 m, mantém-se o erro relativo menor que 1/40.000. Assim, o procedimento desta 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.

Além da alternativa de transformação apresentada, outra abordagem vem sendo aplicada com o objetivo de migrar de um sistema de referência para o outro de uma maneira rápida e acurada (Dalforno *et al.*, 2008). Tal abordagem tem base na teoria que permite a transformação de referenciais cartesianos geodésicos em cartesianos locais, bem como a sua operação inversa. Essa teoria está desenvolvida em Andrade (1998, p. 74) e em Monico (2008, p. 150-152) 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 trabalhos técnicos e científicos desenvolvidos para estabelecer o georreferenciamento dos pontos no plano topográfico, uma situação indispensável à correta implantação de obras de engenharia, quando o método aplicado for a tradicional 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 o 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, acurácia 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).

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. Além disso, pretende-se gerar um levantamento planialtimétrico no PTL e seu modelo digital do terreno (MDT), a partir de levantamento geodésico de pontos efetuado com receptor GPS, em modo relativo estático e rápido estático, comparando-o com o mesmo modelo obtido a partir do levantamento topográfico executado com estação total.

O estudo objetiva, ainda: (i) determinar o tempo mínimo de rastreamento para cada ponto, que possa ser confiável, considerando-se a precisão e a acurácia do levantamento; (ii) comparar estatisticamente os resultados obtidos, após a transformação em coordenadas locais, com os dados obtidos por levantamento taqueométrico; e, (iii) estabelecer um indicador da qualidade posicional dos valores obtidos, segundo a metodologia estabelecida no Decreto 89.817/84 - Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, de 20/06/1984 (Brasília, Diário Oficial da União) e pela proposta *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA, 1998), destinados a medir e a classificar a qualidade de dados geográficos.

A TERRA E SUAS REPRESENTAÇÕES

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.

A 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, impossibilitado que implica na necessidade de serem efetuadas simplificações em sua forma. Essas simplificações, representadas pelo geóide e pelas superfícies de referência [elipsoide, esfera e plano topográfico local (PTL)], possibilitam a expressão matemática dessas operações topográficas e geodésicas.

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

Elipsoide de revolução

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

O elipsoide de revolução 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 elipsoide é definido, em forma e dimensões, pelos parâmetros:

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

O achatamento é dado pela fórmula:

$$f = 1 - b/a \tag{1}$$

Na fórmula (1), b é o semieixo menor.

Pontos da superfície da Terra, quando definidos em relação a um elipsoide de referência, têm as suas coordenadas ex-

pressas no Sistema Cartesiano Ortogonal Tridimensional (X, Y, Z) ou em coordenadas elipsoidais geográficas (latitude e longitude geodésicas e altura elipsoidal).

Plano local topográfico (PTL)

O plano local topográfico (Topografia) desconsidera a curvatura da terra e é perpendicular à vertical do lugar no ponto da superfície terrestre considerado como origem do levantamento. Nessa simplificação, não se observam 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 elipsoide.

SISTEMA GEODÉSICO DE COORDENADAS CARTESIANO TRIDIMENSIONAL

O Sistema de Coordenadas Cartesianas Tridimensionais é estabelecido sobre o elipsoide de revolução e constituído de três eixos perpendiculares. A origem do sistema é a intersecção dos dois eixos da elipse; o eixo X, coincidente com o plano equatorial e positivo na direção da longitude 0°, e o eixo Y, também situado no plano equatorial, e positivo na direção da longitude 90°. O

eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da terra e é positivo na direção do 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 elipsoide.

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). A metodologia que aqui se propõe permite transformar, também, coordenadas geodésicas em coordenadas topográficas.

A Figura 1 ilustra as coordenadas cartesianas, as coordenadas angulares e a altura elipsoidal do ponto P.

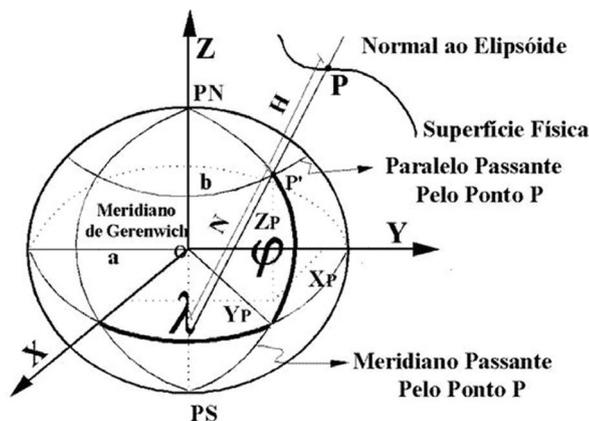


Figura 1. Coordenadas do ponto (P) projetado sobre o elipsoide (P') e referidas ao Sistema de Coordenadas Geodésicas Cartesianas Ortogonais, vistas em conjunto com as coordenadas elipsoidais geodésicas.
Figure 1. Coordinates of the point (P) projected on the ellipsoid (P') and referred to the Geodesics Cartesian Coordinate System, seen together with the ellipsoid geodetic coordinates.

SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRE LOCAL

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

Para cada direção, as operações de campo se resumirão na determinação dos três elementos topográficos principais: 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 (L), 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 2 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 elipsoide que passa pelo ponto P e, no caso, a origem do sistema.

TRANSFORMAÇÕES ENTRE OS DOIS SISTEMAS

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 de Andrade (1998, p. 98):

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{sen}\varphi_0 & \cos\varphi_0 \\ 0 & -\cos\varphi_0 & \operatorname{sen}\varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\operatorname{sen}\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ -\cos\lambda_0 & -\operatorname{sen}\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Conforme (2):

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.

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

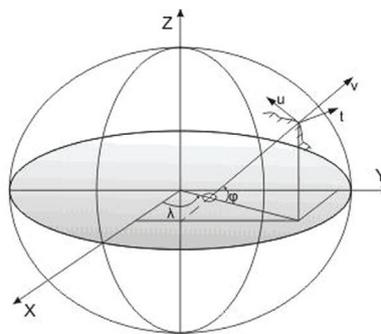


Figura 2. Sistema de coordenadas terrestre local (Sistema geodésico local), visto em conjunto com o sistema geodésico de coordenadas cartesianas tridimensional e associados a um mesmo ponto ($u = N$, $t = E$, $v = U$).
Figure 2. Local Terrestrial Coordinate System (Local Geodetic System) seen together with the geodetic system of three-dimensional Cartesian coordinates and associated to the same point ($u = N$, $t = E$, $v = U$).

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

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen}\lambda_0 & -\cos\lambda_0 & 0 \\ \cos\lambda_0 & -\operatorname{sen}\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \operatorname{sen}\varphi_0 & -\cos\varphi_0 \\ \cos\varphi_0 & \operatorname{sen}\varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em (3):

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_0, Y_0 e Z_0 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 geodésico da direção de dois pontos comuns aos dois tipos de levantamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento de campo para a obtenção dos dados foi realizado em uma área rural situada no 3º Distrito de Pains, Município de Santa Maria. A área escolhida tem relevo suavemente ondulado, com cobertura vegetal rasteira, característica que permite amplo ângulo de rastreamento de sinais de satélites GPS. A distância média entre a área e a estação Santa Maria-RS (SMAR) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) é de, aproximadamente, 1600 m.

A Figura 3 apresenta um croqui da área levantada e de sua situação em relação à Estação SMAR da RBMC.

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 mm + 0,5 ppm e a vertical é de 5 mm + 0,5 ppm.

Para os mesmos pontos em coordenadas topográficas, usou-se a estação total modelo Leica TPS 805, com as características de apresentar, para medição angular no método absoluto contínuo, a resolução de 1" e desvio-padrão de 5", e, para a medição de distâncias com prisma, o desvio-padrão é de 5 mm + 2 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, o programa computacional Posição. A transformação de sistemas de coordenadas foi efetuada com o emprego do programa computacional Transgeolocal, que tem como fundamento matemático as transformações expostas anteriormente (Dalforno *et al.*, 2008).

A tabulação dos dados e suas estatísticas foram obtidas no programa computacional *Excel* e a apresentação gráfica dos levantamentos planialtimétricos gerados valeu-se do programa computacional CAD.

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

A execução do trabalho desenvolveu-se 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, que foram aproveitados para a geração de um bom MDT, quando associados a mais pontos. Todos foram ocupados e avaliados segundo os dois métodos de levantamento que estavam em teste, o método geodésico caracterizado pelo emprego do receptor GPS Hiper, no método relativo e o método topográfico de 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, mesmo equipamento utilizado na observação topográfica com o prisma. Os demais quatorze pontos foram ras-

treados no método dinâmico *stop and go* com o equipamento apoiado em bastão. Para o uso da estação total, usou-se o mesmo sistema de apoio para o prisma.

A fim de determinar um tempo mínimo adequado de rastreo e uma taxa

de coleta de dados, empregaram-se os seguintes tempos e taxas de rastreo: (i) nos pontos considerados vértices (cinco primeiros pontos da Tabela 1), 10 minutos de rastreo e taxa de 5 segundos; (ii) nos dez pontos seguintes da Tabela 1, um

Tabela 1. Discrepância entre as coordenadas topográficas e as coordenadas topográficas transformadas, a partir do GPS. Tempo e taxa de rastreo, 19 pontos da primeira etapa. **Table 1.** Discrepancy between the topographical coordinates and topographic transformed coordinates from the GPS. Time and screening rate, 19 points in the first stage.

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
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.

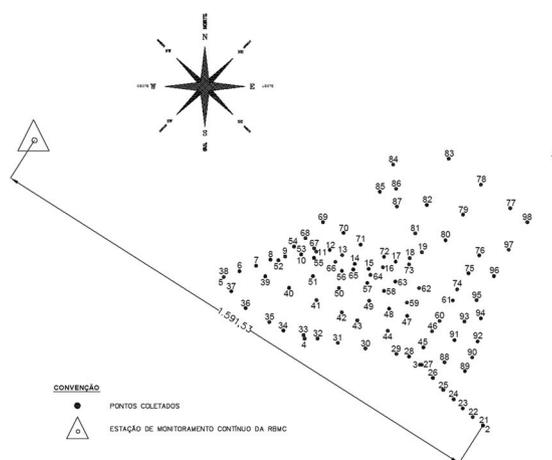


Figura 3. Croqui da área levantada, mostrando os pontos e a Estação SMAR da RBMC em escala aproximada.

Figure 3. Sketch of the surveyed area showing the points and the SMAR Station of the RBMC in an approximated scale.

tempo de 30 segundos de rastreamento e taxa de 5 segundos; (iii) nos últimos quatro pontos, um tempo maior do que 15 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 topográficas obtidas no levantamento topográfico foram reorientadas de maneira a assumirem os mesmos azimutes geodésicos obtidos na transformação anterior. Os resultados, quando comparados, permitem verificar se as coordenadas dos demais pontos necessários para o levantamento planialtimétrico podem ser obtidas com precisão e acurácia adequadas, usando um tempo de coleta maior do que 15 segundos, menor do que 30 segundos e taxa de 1 segundo.

Na segunda etapa, foram tomadas medidas de mais 82 pontos, seguindo o mesmo procedimento especificado no parágrafo anterior, no que se refere ao tempo de rastreamento e à taxa de coleta. Nos resultados, foram analisadas as ambiguidades e verificada a magnitude dos *root mean-square* (RMS), 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 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 padrão), bem como a discrepância total no plano horizontal (t, u) . Para que seja possível estabelecer a precisão e a acurácia das coordenadas obtidas, as discrepâncias total no plano horizontal 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 de 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, 1998), que estabelece critérios para medir e descrever a qualidade de dados geográficos e também o *Positional Accuracy Handbook* (1999), que complementa o estabelecido pelo NSSDA.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As coordenadas geodésicas dos dezoito pontos levantados na primeira etapa, a partir de observações GPS, apresentaram ambiguidade 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 da Tabela 1. Como pode ser visto, as discrepâncias individuais nos eixos e a discrepância total no plano horizontal apresentam variações em sua quase totalidade, na ordem do centímetro para qualquer um dos tempos testados. Essa constância e dimensão dos resultados fizeram com que se optasse por testar, como tempo mínimo de coleta, um intervalo maior do que 15 e menor do que 30 segundos e taxa de 1 segundo.

Dos 82 pontos levantados, na segunda etapa, foram aproveitados 80 pontos. O processamento desses dados apresentou ambiguidade 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. As discrepâncias observadas em 80 pontos são apresentadas na Tabela 2.

Nesta tabela e nas Figuras 4 a 7, é possível observar que, ao se diminuir o tempo de rastreamento, o mesmo comportamento não foi seguido pelas grandezas das discrepâncias em relação à primeira etapa (na ordem do centímetro), apresentando 20% dos resultados com valor superior a 0,15 m. Além disso, em aproximadamente 4% dos casos, o valor foi superior a 1,00 m. Estes resultados deixam claro que não existe confiabilidade de acurácia nos dados obtidos com o tempo de rastreamento escolhido como mínimo, desejáveis para a geração de MDT em escala grande.

No entanto, essa constatação, por si só, não é um parâmetro seguro sobre a qualidade dos dados obtidos, no uso em representações em plantas nas quais se empregam escalas de redução. Para tanto, as discrepâncias obtidas foram submetidas às metodologias propostas (ver Material e Métodos).

Quando se trataram os dados de acordo com o que estabelece o Decreto 89.817/84, utilizou-se, a metodologia de Merchant (1982), que forneceu resultados para as médias e os desvios-padrão das discrepâncias, expressos na Tabela 3.

O teste de tendência (Teste de Student ao nível de 90%) para a verificação da presença de erros sistemáticos utilizado foi:

$$\begin{aligned} |t_t| &\leq t_{(n-1;\alpha/2)} & t_t &= 3,604 > 1,651 \\ |t_u| &\leq t_{(n-1;\alpha/2)} & t_u &= 0,507 < 1,651 \\ |t_v| &\leq t_{(n-1;\alpha/2)} & t_v &= 0,639 < 1,651 \end{aligned}$$

As discrepâncias obtidas nos eixos t e u , conseqüentemente, a discrepância total horizontal, contêm erros sistemáticos que devem ser identificados e corrigidos.

Prosseguindo com a metodologia e desconsiderando a presença desses erros sistemáticos, aplicou-se o teste do Qui-quadrado, visando comparar 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. Igualmente se objetivou identificar a escala de carta ou planta para a qual os resultados obtidos satisfazem a precisão.

Os valores do Erro Padrão (EP) e do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para as três possíveis classes estabelecidas pelo Decreto 89.817/84 e para a escala 1:1.000 são apresentadas na Tabela 4.

A partir daí, aplicando-se o Teste do Qui-quadrado, têm-se que $\chi^2_{98,0,10} > \chi^2_{t,n-1}$ e $\chi^2_{98,0,10} > \chi^2_{u,n-1}$, e, usando-se a tabela do teste, o resultado de $\chi^2_{98,0,10} = 116,31$.

A Tabela 5 mostra os valores do teste do Qui-quadrado, aplicado para s e EP, na escala de 1:1000.

Comparando os valores obtidos para $\chi^2_{t,n-1}$, $\chi^2_{t,n-1}$ e $\chi^2_{u,n-1}$ com o $\chi^2_{98,0,10}$, é possível concluir que os resultados para as coordenadas t e u (planimétricas) são precisos, para representações em escala 1:1000 das Classes B e C. Consequentemente, serão precisos, igualmente, para escalas menores, em qualquer uma das classes. E a precisão vertical será atendida para espaçamentos de curvas de metro em metro para estas mesmas classes.

Aplicando, para a totalidade dos dados obtidos, nas duas etapas, a metodologia estabelecida pelo NSSDA para o cálculo da estatística da acurácia horizontal e da estatística da acurácia vertical, pode-se afirmar que: (i) ao nível de confiança de 95%, existe uma acurácia horizontal de 0,473 m e um RMSE das discrepâncias de 0,273 m; (ii) ao nível de confiança de 95%, existe uma acurácia vertical de 0,733 m e um RMSE das discrepâncias verticais de 0,374 m. Desse modo, se 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, com traçados de curvas de nível equidistantes de 1,50 m.

Empregando a mesma metodologia somente para os dados obtidos na primeira etapa, ter-se-ia a seguinte constatação: (i) ao nível de confiança de 95%, existe uma acurácia horizontal de 0,076 m e um RMS das discrepâncias de 0,044 m; (ii) ao nível de confiança de 95%, existe uma acurácia vertical de 0,111 m

Tabela 2. Discrepância entre as coordenadas topográficas e as coordenadas topográficas transformadas a partir do GPS. Tempo e taxa de rastreamento, 80 pontos da segunda etapa.
Table 2. Discrepancy between the topographical coordinates and topographic transformed coordinates from the GPS Time and screening rate, 80 points in the second stage.

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"
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"

continua

Tabela 2. Continuação

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
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"
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.

Tabela 3. Médias e desvios-padrão das discrepâncias obtidas com os 99 pontos.

Table 3. Means and standard deviations of the discrepancies obtained with 99 points.

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

Tabela 4. Valores do Erro Padrão (EP) e do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para cartas na escala 1:1.000.

Table 4. Values of Standard Error (SE) and Cartography Accuracy Standard (CAS) for the map in the scale 1:1.000.

Cartas Esc.:1:1.000	EP Δt (m)	EP Δu (m)	EP Δv (m)	PEC Δt (m)	PEC Δu (m)	PEC Δv (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

e um RMSE das discrepâncias verticais de 0,056 m, o que permite concluir que, se considerada uma resolução de 0,2 mm, seria permitido o emprego dos resultados obtidos para a construção de cartas ou plantas em escalas inferiores a 1:380, com traçados de curvas de nível equidistantes de 0,25 m.

A Figura 8 mostra as curvas de nível espaçadas de metro em metro geradas a partir dos dois MDT gerados. É possível observar as diferenças no traçado de algumas curvas de nível de mesma altura elipsoidal, causadas pelas discrepâncias encontradas entre as medidas efetuadas pelos dois métodos de levantamento testados. Atesta, também, que ambos os MDT representam morfologia semelhante do terreno.

CONCLUSÕES

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 rastreamento maior do que 15 e menor do que 30 segundos, e em uma taxa de rastreamento de 1 segundo, se mostrou adequado para a geração de MDT em coordenadas geodésicas locais, quando for gerado em escala igual ou inferior a 1:1.000 e com curvas de nível espaçadas de metro em metro (classes B e C do Decreto 89.817/84).

Ainda demonstrou que, com os valores obtidos pelos critérios do NSSDA, quando se emprega a resolução gráfica mais rigorosa de 0,2 mm, é possível elaborar plantas em escalas iguais ou inferiores a 1:2.500 e com curvas de nível espaçadas a cada 1,50 m.

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

O método testado também se mostra adequado, rápido e econômico, para trabalhos em grandes áreas, sempre que exista baixa densidade de vegetação.

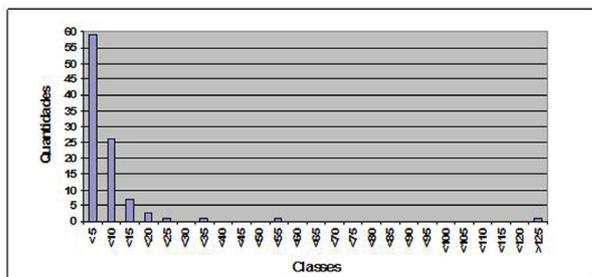


Figura 4. Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo t (classes de 5 cm), para todos os 99 pontos (organizada por M. Sampaio).

Figure 4. Frequency distribution of the discrepancies in the t axis (classes of 5 cm), to all 99 points.

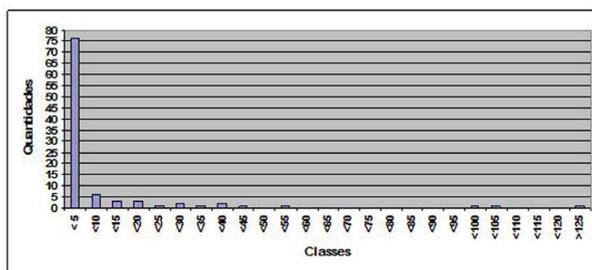


Figura 5. Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo u (classes de 5 cm), para os 99 pontos (organizada por M. Sampaio).

Figure 5. Frequency distribution of the discrepancies in the axis u (classes of 5 cm), to all 99 points.

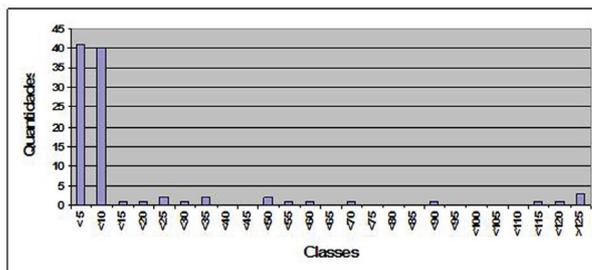


Figura 6. Distribuição de frequência das discrepâncias no eixo v (classes de 5 cm), para todos os 99 pontos (organizada por M. Sampaio).

Figure 6. Frequency distribution of the discrepancies in the v axis (classes of 5 cm), to all 99 points.

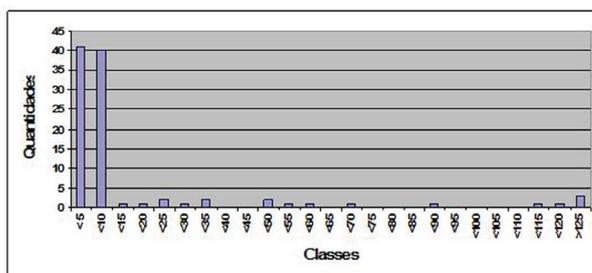


Figura 7. Distribuição de frequências da discrepância total no plano horizontal (t, u), em classes de 5 cm, para todos os 99 pontos (organizada por M. Sampaio).

Figure 7. Frequency distribution of the total discrepancy in the horizontal plane (t, u), in 5 cm classes and to all 99 points.

RECOMENDAÇÕES

Algumas recomendações devem ser feitas, em função dos resultados obtidos: (i) repetir o experimento usando tempo de rastreamento 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 rastreamento; (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 rastreamento de 1".

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J.B. de. 1998. *Fotogrametria*. Curitiba, SBEE. 258 p.
- NBR 14.166. 1998. Rede de referência cadastral municipal – Procedimento. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 23 p.
- DAL'FORNO, G.L.; ANTONIAZZI, R.L.; STRIEDER, A.J.; AGUIRRE, A.J. 2008. Programa computacional para la transformación de Coordenadas Geodésicas Geocéntricas en Coordenadas Topográficas Locales y el proceso inverso. In: CONGRESO ARGENTINO, 10 Y LATINOAMERICANO DE AGRIMENSURA, 7, Santa Fé, *Anais* (Digital).
- ESPARTEL, L. 1975. *Curso de Topografía*. Porto Alegre, Globo. 655 p.
- FUENTEALBA, O.C.; LANGE, H.; ZEPEDA, R.G. 2001. *Manual de Carreteras. Procedimientos de Estudios Viales*, vol. 2. Santiago, Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. 291 p.
- JAKELI, C. 2006. *Geometric Reference Systems*. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Sciences. Ohio State University, 195 p.
- MERCHANT, D.C. 1982. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, Denver, CO, *Technical Papers*, 1:222-231.
- MONICO, J.F.G. 2008. *Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações*. 2ª ed., São Paulo, Fundação Editora UNESP, 480 p.

Tabela 5. Valores de $\chi^2_{t, n-1}$, $\chi^2_{u, n-1}$, e $\chi^2_{tu, n-1}$ para as diversas classes na escala 1:1.000.
Table 5. Values of $\chi^2_{t, n-1}$, $\chi^2_{u, n-1}$, e $\chi^2_{tu, n-1}$ for different classes in the scale 1:1.000.

Classe	$\chi^2_{t, n-1}$	$\chi^2_{u, n-1}$	$\chi^2_{tu, n-1}$	$\chi^2_{v, n-1}$
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



Figura 8. Figura representativa das curvas de nível e suas discrepâncias, obtidas a partir dos dois modelos digitais do terreno (MDT).

Figure 8. Representation the level curves and their differences, obtained from two digital terrain models (DTM).

NEWTON, I. 1687. *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, 538 p.

NSSDA (NATIONAL SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE). 1998. Geospatial Positioning Accuracy Standards – Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Disponível em <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>; acessado em 05/01/2009.

POSITIONAL ACCURACY HANDBOOK. 1999. *Using the National Standard for Spatial Data Accuracy of measure and report geographic data quality*. Minnesota Planning Land Management Information Center. Disponível em http://www.mnplan.state.mn.us/pdf/1999/lmic/nssda_o.pdf; acessado em 10/01/2009.

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

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

TORGE, W. 2001. *Geodesy*. 3ª ed. Berlin, De Gruyter, 416 p.

ZANETTI, M.A.Z. 2007. *Geodésia*. Disponível em <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/geodesia/apostila.pdf>; acessado em 10/08/2009.

Submetido em: 06/05/2009

Aceito em: 06/10/2009