

MODELOS PARA ESTIMATIVA DA ACURÁCIA E PRECISÃO EM LEVANTAMENTOS COM GPS

MODELS FOR ESTIMATING THE ACCURACY AND PRECISION ON GPS SURVEYS

Alexandre ten Caten^{1*}; Adroaldo Dias Robaina².

RESUMO

Precisão e acurácia são indicadores da qualidade em levantamentos GPS. A qualidade de um levantamento realizado no modo relativo estático é uma função do tempo de rastreamento e da distância entre receptores base e móvel. No entanto, as tabelas apresentadas pela literatura especializada não contemplam valores de acurácia e precisão dentro de uma dada faixa de tempo e distância, bem como, não contemplando combinações das mesmas. Este estudo teve como objetivo gerar modelos de previsão para a acurácia e a precisão em levantamentos executados no modo estático relativo, em função da distância entre receptores e da duração da sessão de rastreamento. Em uma poligonal topográfica, localizada no município de Santa Maria – RS, determinada segundo a NBR 13133 utilizando-se Estação Total, foram rastreados nove vértices com receptores GPS de uma única frequência dos fabricantes Ashtech, Sokkia e Topcon. Os tempos de rastreamento dos vértices de 30; 15; 10 e 5 minutos foram processados com bases afastadas de 10 a 640 km. Os modelos propostos para a acurácia e precisão explicaram grande parte da variabilidade dos dados originais, embora o erro padrão dos modelos para acurácia indiquem que sua aplicação não seria adequada em levantamentos relativos estáticos.

Palavras-chave: Tempo de rastreamento, linha base, relativo estático.

ABSTRACT

Precision and accuracy are quality indicators in GPS surveying. The quality of a survey conducted in static mode is a function of session and baseline length. Although, tables presented by the specialized literature do not include values of accuracy and precision within a given range of time and distance, not

as well, combination of them. The aim of this study was on generating models for accuracy and precision prediction in GPS surveys performed in the static mode, as a function of time of site occupation and baseline length. In a test area established through conventional topography, according to NBR 13133 using a Total Station, nine points were GPS surveyed with single frequency receivers of Ashtech, Sokkia and Topcon brands. Session length of 30; 15; 10 and 5 minutes were differentially processed with bases located from 10 to 640 km of the test area. The proposed models for accuracy and precision explained much of the variability found on the original data, although the standard error for accuracy models points towards its inadequacy for relative statics surveys.

Key words: session length, baseline length, relative static.

INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) está lentamente substituindo métodos e equipamentos tradicionais de levantamento. A principal razão para esta tendência se deve ao GPS ser uma ferramenta de levantamento eficiente, econômica e acurada (GREENFELD, 2003). O potencial máximo da tecnologia GPS se expressa através dos levantamentos relativos estáticos alcançando elevadas precisões, embora requeira um grande número de observações em um mesmo local, sendo esta uma desvantagem da tecnologia (CORSEUIL & ROBAINA, 2003).

O tempo de permanência no ponto rastreado e a distância entre as antenas receptoras base e móvel são cruciais para a aplicação da tecnologia GPS com qualidade. Para HOFMANN-WELENHOF et al. (2001) aplicações com receptores GPS em observações estáticas, deveriam observar os tempos de

^{1*} Eng. Agrônomo, Mestre, Professor Instituto Federal Farroupilha Campus Júlio de Castilhos, São João do Barro Preto – Interior, CEP 98130-000, Júlio de Castilhos, RS e-mail: acaten@yahoo.com.br. Autor para correspondência.

² Eng. Agrônomo, Doutor, Departamento de Engenharia Rural, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima 1000, Santa Maria, RS. CEP 97110/110. robaina@gmail.com

(Recebido para Publicação em 15/07/2009, Aprovado em 17/12/2010)

permanência de *30 minutos + 3 minutos / km* para receptores L1 e, tempos de *20 minutos + 2 minutos / km* para rastreios com receptores de dupla frequência. Segundo os autores, esta formulação, apesar de requerer grande tempo de permanência no ponto, irá garantir a solução do tipo FIXED da ambigüidade, extraindo o máximo potencial da tecnologia. SEEBER (2003) discute que a solução do tipo FIXED é função da linha de base entre receptores e tempo de rastreio nos pontos, sendo que a observação de tempos entre 15 e 30 minutos para distância entre antenas receptoras de 10 km deveria ser seguida.

Estudos têm buscado verificar o comportamento da acurácia e da precisão em levantamentos geodésicos executados pela tecnologia GPS. ÂNGULO FILHO et al. (2002) determinaram que maiores tempos de rastreio implicam em maior exatidão do posicionamento. Os autores realizaram esta avaliação com receptor GPS operando sob diferentes coberturas vegetais. Buscando responder a pergunta: "Quanto tempo devemos esperar?" GREENFELD (2003) utilizou-se de diferentes bases próximas para avaliar a qualidade das coordenadas obtidas em levantamentos estáticos. Segundo o autor, uma acurácia de 1,5 cm pode ser obtida com rastreios de cinco minutos, e valores subcentimétricos podem ser alcançados com rastreios de até 30 minutos de observação. Já CORSEUIL & ROBAINA (2003) verificaram que tempos de rastreio de 30 minutos devem ser considerados para distâncias de até 20 km entre receptores, sendo a reconstituição de uma poligonal topográfica dependente da qualidade dos dados coletados pelos receptores GPS, por sua vez, influenciados pelo tempo de ocupação dos pontos.

Para SANTOS & SÁ (2006) o efeito da ionosfera nos erros de posicionamento utilizando-se de receptores de simples frequência em bases longas, passa a ser distinto nos receptores, impossibilitando o uso destes equipamentos nesta situação. Os autores apresentaram gráficos dos erros em função dos comprimentos da linha base em diferentes tempos de rastreio, com a leitura destes gráficos demonstrando que em distâncias acima de 30 km os erros assumem um padrão quase que aleatório, variando em até um metro nas coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geodésica). Estes resultados provavelmente estão relacionados à solução não inteira das ambigüidades, uma vez que o estudo foi realizado com receptores de uma única frequência em tempos de 10 minutos em bases de até 250 km.

Este estudo teve como objetivo verificar a influência do tempo de rastreio e distância entre receptores na qualidade de medidas efetuadas com GPS, gerando modelos que possam ser úteis na

predição da acurácia e da precisão do levantamento com esta tecnologia.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, de coordenadas centrais 29°43' S e 53°42' W, no município de Santa Maria, RS. Foi estabelecida uma poligonal de coordenadas planimétricas consideradas verdadeiras para o experimento. O levantamento dos vértices da poligonal testemunha foi executado segundo a NBR 13133 – Execução de Levantamentos Topográficos. Com uma área de 47,5 hectares a poligonal constituiu-se de nove vértices, os quais tiveram suas coordenadas planimétricas obtidas por caminhamento perimétrico com o equipamento Estação Total SOKKIA SET5F [precisão de $\pm (3 + 2 \text{ ppm} \times D)$ mm]. As coordenadas finais de cada vértice foram determinadas por ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados, aplicado aos dados coletados em uma série de quatro caminhamentos na poligonal.

O rastreio dos nove vértices foi executado pelo método relativo estático. Foram utilizados três modelos de receptores de frequência simples: Topcon modelo GP-R1, Sokkia modelo GSS1A e Ashtech modelo PROMARK II. A taxa de armazenamento das observáveis foi fixada em cinco segundos e a máscara de elevação em 15°. O equipamento permanecia ligado por 30 minutos em cada ponto, num total de três sessões por vértice. Os arquivos originais de levantamento foram fracionados em três outros tempos de rastreio: 15; 10 e 5 minutos, de tal forma que, o arquivo original de 360 épocas dava origem a três novos arquivos de 180; 120 e 60 épocas. Foram utilizados como receptores base para o pós-processamento das observáveis, receptores localizados em municípios os quais fazem parte de redes de monitoramento contínuo acessíveis pela Internet, conforme o esquema da Tabela 1. As diferenças entre bases usadas para cada receptor se devem ao fato dos receptores nas bases estarem desligados na data em que os levantamentos foram executados na poligonal do estudo. O processamento foi realizado no software SOKKIA SPECTRUM SURVEY, versão 1,20 (SOKKIA, 2004). Neste, o processamento é realizado utilizando-se a dupla diferença de fase, sendo fixados: o ângulo de corte em 15°, o $\text{RATIO} \geq 3$, as efemérides do tipo transmitidas, a correção do efeito da troposfera pelo modelo HOPFIELD, e sem correção ionosférica, modo de seleção de satélite referência dinâmico e nível de significância em 1σ . Todos os resultados trabalhados originaram-se de solução do tipo FLOAT para a ambigüidade.

Tabela 1 – Receptores utilizados, duração das sessões de rastreamento, cidades das bases utilizadas como referência e distância aproximada entre bases e a poligonal do estudo.

Receptor	Tempos modelados (min.)	Bases utilizadas	Distâncias (km)
Ashtech	5; 10; 15; 30	Santa Maria	10
		Porto Alegre	250
		Lages	395
		Curitiba	640
Sokkia	5; 10; 15; 30	Santa Maria	10
		Porto Alegre	250
		Criciúma	442
		Curitiba	640
Topcon	5; 10; 15; 30	Porto Alegre	250
		Lages	395
		Curitiba	640

Neste estudo não está sendo considerado o efeito da utilização de dados oriundos de coletas realizadas em diferentes horários, e nem de erros causados por dados coletados com diferentes aparelhos. Como este estudo tem um caráter de ineditismo em sua proposta de modelar o efeito da distância e tempo de rastreamento preconizou-se por utilizar bases e dados disponíveis. Contudo, em futuros estudos deverá ser buscada a utilização de modelos de receptores GPS similares em cada local de rastreamento, além de se efetuar os rastreios simultaneamente em todas as distâncias a serem testadas. Devendo ser preconizada a utilização de receptores de dupla frequência e solução do tipo FIXED das ambigüidades.

Visando avaliar a qualidade das coordenadas dos vértices da poligonal determinados por GPS, foi necessário compará-las com coordenadas tidas como “verdadeiras” e anteriormente determinadas através de topografia convencional. Desta comparação resulta o grau de exatidão ou acurácia das coordenadas determinadas por GPS. O termo acurácia é um conceito qualitativo para descrever quanto o resultado medido é próximo do valor verdadeiro. Por outro lado, o desvio padrão indicará a medida de repetibilidade das observações para cada receptor, em diferentes tempos e distâncias, tida aqui como a precisão das medidas. Este será obtido a partir dos relatórios de processamentos dos dados GPS, que informam para cada vértice processado, a dispersão das medidas envolvidas na determinação da coordenada do ponto.

Visto que as coordenadas obtidas pela Estação Total estão referenciadas ao plano topográfico local, diferentemente das coordenadas obtidas através de GPS, as quais são relacionadas a um modelo matemático da superfície, elas não podem ser diretamente comparadas. Para contornar esta situação, as coordenadas GPS referidas ao sistema WGS84, foram transformadas para o sistema topográfico local, o mesmo do caminhamento perimétrico com Estação Total, através de procedimento descrito em HOFMANN-WELENHOF et al. (2001).

Uma vez que todos os dados estavam em um mesmo sistema de referência, foram determinadas as diferenças de coordenadas entre os receptores GPS em relação às coordenadas “verdadeiras”, para cada distância e tempo de rastreamento. Esta diferença, tida como a acurácia do levantamento por GPS, foi determinada por:

$$\delta = \sqrt{(X_{ET} - X_{GPS})^2 + (Y_{ET} - Y_{GPS})^2}$$

(1)

em que:

δ = diferença plana entre o levantamento efetuado por GPS e por Estação Total (erro posicional);

X_{ET} = coordenada plana “verdadeira” no eixo X;

X_{GPS} = coordenada plana obtida por GPS no eixo

X;

Y_{ET} = coordenada plana “verdadeira” no eixo Y;

Y_{GPS} = coordenada plana obtida por GPS no eixo

Y.

A precisão para cada um dos receptores nas diferentes distâncias e tempos de rastreamento foi determinada a partir do desvio padrão, o qual foi obtido nos relatórios de pós-processamento dos dados coletados em cada um dos vértices.

Visando atender a proposta de colocar a qualidade desejada de um levantamento em função da distância entre receptores e o tempo de ocupação do ponto, equações foram desenvolvidas para modelar o comportamento da acurácia e da precisão nos levantamentos por GPS.

Em um primeiro passo a acurácia foi relacionada ao tempo de rastreamento através de expressões como:

$$\delta = a + b \times T^i$$

(2)

em que:

a e b = constantes do modelo;

T = tempo da sessão de rastreamento (em minutos);

i = expoente do modelo.

O segundo passo foi equacionar os valores de *a* e *b* da equação (2) em função da distância:

$$a = a' + b \times D \tag{3}$$

e,

$$b = a'' + b'' \times D \tag{4}$$

nas quais:

a', *b'*, *a''* e *b''* = são as constantes do modelo;

D = distância entre os receptores base e móvel (em km).

Sendo o modelo final para a acurácia, em relação à distância e o tempo, assim escrito:

$$\delta = (a' + b \times D) + (a'' + b'' \times D) \times T^i \tag{5}$$

A modelagem da precisão teve por base o mesmo procedimento. Resultando em uma equação do tipo:

$$\sigma = (a' + b \times D) + (a'' + b'' \times D) \times T^i \tag{6}$$

σ = precisão plana do levantamento efetuado por GPS.

A opção pelo tipo de equação para expressar a acurácia e a precisão se deu através daquelas que tivessem os coeficientes de determinação (*R*²) mais elevados na primeira etapa, quando da modelagem de cada uma em relação ao tempo. Os modelos tiveram sua qualidade avaliada a partir de análise de regressão simples, onde 70% dos dados foram utilizados para a

geração das equações, e 30% para posterior verificação da aderência entre dados modelos e observados. Também foi calculada a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*) conforme:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \tag{7}$$

onde:

y_i = *i*-ésimo valor observado;

\hat{y}_i = *i*-ésimo valor estimado pelos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As coordenadas planas locais dos vértices levantados por GPS foram comparadas às coordenadas consideradas neste trabalho como verdadeiras obtidas através de topografia convencional executada com Estação Total. Esta informação do erro posicional nos vértices da poligonal gerou o dado de acurácia (δ) do levantamento para cada tempo de ocupação (*T*) e distância entre estações (*D*). Tomando-se um valor médio da acurácia nos nove pontos e três repetições para cada tempo e distância, foi possível tabelar este erro e seu desvio padrão em função das variáveis *T* e *D* para cada um dos três receptores utilizados, Tabela 2.

Tabela 2 – Média e desvio padrão do erro posicional para cada comprimento do vetor linha base e tempo de rastreo obtidos em cada um dos três receptores utilizados, valores em metros.

Tempo (min)	Estatística	ASHTECH				SOKKIA				TOPCON		
		Distância (km)				Distância (km)				Distância (km)		
		10	250	395	640	10	250	442	640	250	395	640
5	média	0,551	2,526	4,017	5,816	0,564	2,011	2,054	2,027	2,618	3,752	3,164
	desvio padrão	0,322	1,701	2,278	3,085	0,459	1,422	1,714	1,492	1,881	2,723	2,619
10	média	0,388	2,747	2,700	5,375	0,418	1,997	1,836	1,955	1,964	2,881	2,720
	desvio padrão	0,226	2,272	1,405	2,083	0,288	1,782	1,305	1,528	1,241	2,041	2,102
15	média	0,196	1,918	3,375	3,958	0,343	1,921	1,560	2,019	1,527	2,347	2,431
	desvio padrão	0,133	1,460	1,805	1,412	0,255	1,564	0,756	1,734	1,489	1,972	1,614
30	média	0,191	1,340	3,763	3,502	0,188	1,393	1,545	1,930	1,325	1,904	2,147
	desvio padrão	0,106	0,886	1,496	0,775	0,185	1,277	1,359	1,713	0,890	1,555	1,104

Para um mesmo comprimento de linha base, o que se observa é uma tendência de que tempos maiores possibilitam coordenadas cada vez mais acuradas (erros posicionais menores). Assim como, para um mesmo tempo de rastreo há uma tendência de que menores distâncias impliquem em menores erros, embora estas sejam tendências, existem valores na tabela que não seguem este padrão, uma vez que, neste estudo foram utilizados dados oriundos da solução do tipo FLOAT das ambigüidades. Este mesmo comportamento dos dados, com origem na

solução não inteira das ambigüidades, foi reportado na forma de gráficos por KRUEGER (2001) e SANTOS & SÁ (2006).

Em geral, na medida em que bases cada vez mais distantes são utilizadas para a determinação das coordenadas do receptor móvel, o erro posicional aumenta, assim como seu desvio padrão. Os erros atingiram valores da ordem de 5,816±3,085 metros quando se utilizou o receptor Ashtech em sessão de rastreo de cinco minutos com a base a 640 km de distância. Erros desta magnitude ocorrem uma vez que

receptores de uma única frequência não possibilitam que a componente ionosférica do erro seja modelada pelos programas de pós-processamento (MONICO, 2000). Além do que, à medida que o comprimento da linha base aumenta o efeito da não uniformidade da componente atmosférica deteriora a qualidade das coordenadas obtidas (SILVA et al. (1999); HOFMANN-WELENHOF et al. (2001); SEEGER (2003)). Como os erros posicionais da Tabela 2 são todos originados em soluções do tipo FLOAT para o número de ciclos da portadora, observa-se que a grande maioria dos erros

esteve acima de um metro. ARANA et al. (1997) e ten CATEN et al. (2007) relataram a dificuldade em se obterem soluções inteiras para a ambigüidade, utilizando-se sessões de rastreamento de pouco tempo em distâncias longas entre receptores de uma única frequência.

A modelagem da precisão (σ) partiu dos valores de desvio padrão horizontal gerados no pós-processamento das observáveis. Dos nove pontos em três repetições resultaram os valores médios da Tabela 3.

Tabela 3 – Média e desvio padrão da precisão para cada comprimento do vetor linha base e tempo de rastreamento obtidos em cada um dos três receptores utilizados, valores em metros.

Tempo (min)	Estatística	ASHTECH				SOKKIA				TOPCON		
		Distância (km)				Distância (km)				Distância (km)		
		10	250	395	640	10	250	442	640	250	395	640
5	média	0,088	0,290	0,430	0,561	0,104	0,252	0,249	0,282	0,546	0,791	0,854
	desvio padrão	0,041	0,162	0,345	0,476	0,038	0,164	0,155	0,180	1,164	1,169	1,386
10	média	0,040	0,211	0,294	0,369	0,046	0,137	0,157	0,194	0,552	0,741	0,833
	desvio padrão	0,019	0,118	0,216	0,293	0,020	0,078	0,101	0,129	1,079	1,619	1,594
15	média	0,025	0,145	0,223	0,287	0,066	0,102	0,122	0,156	0,344	0,406	0,488
	desvio padrão	0,011	0,081	0,182	0,231	0,178	0,061	0,075	0,135	0,592	0,680	0,712
30	média	0,011	0,076	0,160	0,185	0,018	0,066	0,082	0,168	0,191	0,307	0,274
	desvio padrão	0,006	0,052	0,153	0,215	0,015	0,039	0,055	0,275	0,390	0,499	0,346

Da mesma forma como ocorrido para a acurácia, ocorreu uma tendência de que a precisão dos rastreios foi maior para levantamentos com mais tempo de ocupação dos vértices, como em 15 e 30 minutos, e com comprimentos dos vetores linha base mais curtos como em 10 km. Como a precisão está associada ao número de observações, um maior tempo de rastreamento, leva a menores valores de dispersão. Assim como, distâncias menores entre receptores têm uma menor influência das componentes da atmosfera, especialmente em receptores de uma única frequência, produzindo valores menos dispersos quando os receptores encontram-se menos afastados. Embora existam dados na Tabela 3 que não seguem este padrão, como quando da utilização do receptor SOKKIA em uma distância de 10 km que resultou em uma precisão média maior ($0,046 \pm 0,020$ m) em 10 minutos de rastreamento do que em 15 minutos ($0,066 \pm 0,178$ m). Acredita-se que este comportamento também possa ser atribuído a origem FLOAT dos dados, tal qual ocorreu na Tabela 2 com os dados de acurácia.

Precisões da ordem de $0,011 \pm 0,006$ m foram alcançadas em rastreios de 30 minutos com distâncias de até 10 km com o receptor Ashtech. Quanto à

magnitude dos valores encontrados, estes estiveram todos abaixo de um metro, tendo sido os maiores valores encontrados ($0,854 \pm 1,386$ m) em rastreios de apenas cinco minutos com receptores distantes 640 km entre si. Resultados semelhantes haviam sido encontrados por ten CATEN et al. (2007), para os quais a precisão seguiu uma tendência de acréscimo à medida que tempos menores foram considerados para linhas de base maiores. Segundo os autores, diferentemente da acurácia, a precisão é tomada em relação a valores durante o processamento, de tal forma que, valores maiores de desvio padrão são encontrados em tempos curtos e bases longas quando a distribuição em torno da média tem seu espectro aumentado. Do contrário, tempos maiores e bases curtas geram valores menos dispersos, consequentemente desvios padrão menores e maior precisão.

Visando atender os objetivos do estudo, 70% dos dados de precisão e acurácia foram então utilizados para gerar as equações e estimar a qualidade do levantamento por GPS considerando combinações de diferentes tempos de rastreamento e distâncias entre receptores base e móvel, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos desenvolvidos para estimar a acurácia e a precisão dos levantamentos efetuados por tecnologia GPS. Distâncias (D) em quilômetros e tempos (T) em minutos.

Receptor	Acurácia (δ)
Ashtech	$(0,126 + 0,004 \times D) + (1,982 + 0,018 \times D) \times T^{-1}$
Sokkia	$(0,336 + 0,003 \times D) + (2,090 + 0,002 \times D) \times T^{-1}$
Topcon	$(0,587 + 0,0023 \times D) + (11,081 + 0,006 \times D) \times T^{-1}$
Todos	$(0,069 + 0,003 \times D) + (1,956 + 0,004 \times D) \times T^{-0,5}$
Receptor	Precisão (σ)
Ashtech	$(0,002 + 0,0002 \times D) + (0,482 + 0,002 \times D) \times T^{-1}$
Sokkia	$(0,0002 + 0,0001 \times D) + (0,732 + 0,003 \times D) \times T^{-1}$
Topcon	$(0,003 + 0,0002 \times D) + (0,321 + 0,0002 \times D) \times T^{-1}$
Todos	$(0,003 + 0,001 \times D) + (0,533 + 0,0001 \times D) \times T^{-0,5}$

Na Tabela 4 as linhas nas quais o receptor foi denominado de “Todos” trazem os modelos para a acurácia e precisão quando todos os dados, oriundos de diferentes receptores, foram considerados como repetições para a modelagem da acurácia e precisão nos levantamentos. Uma espécie de modelo único, desconsiderando o equipamento utilizado.

Cada modelo proposto foi confrontado com os

restantes 30% dos dados oriundos do rastreo da poligonal de referência. Pela Figura 1 verifica-se que o modelo proposto a partir de dados oriundos do receptor Ashtech explica 96% das variações da acurácia para este equipamento. Apesar de suas menores qualidades, os modelos propostos para a acurácia a partir dos modelos Topcon e Sokkia demonstram uma qualidade satisfatória.

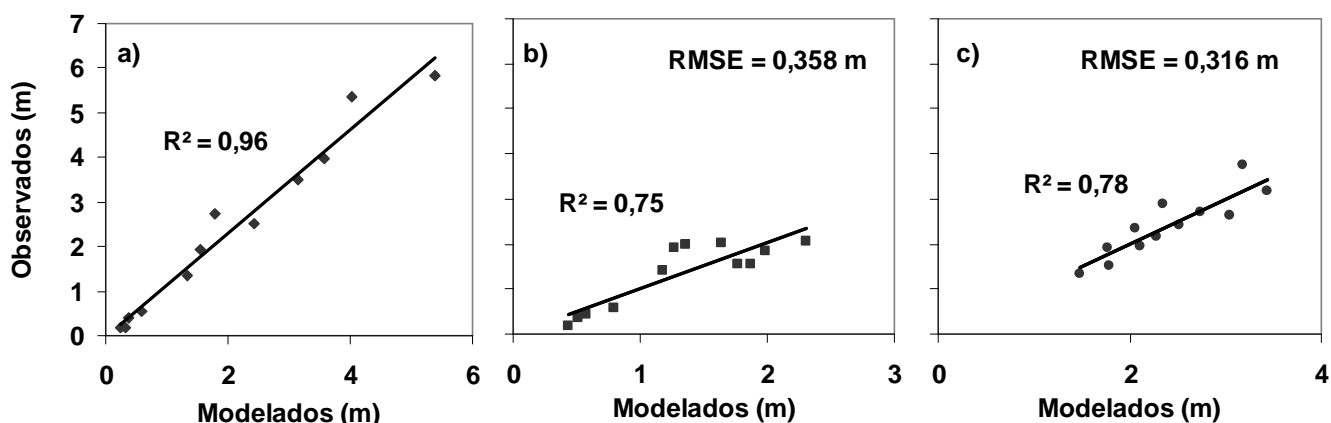


Figura 1 - Regressão entre valores modelados e observados para a acurácia a partir dos receptores Ashtech (a), Sokkia (b) e Topcon (c).

No entanto, a análise da raiz do erro quadrático médio (RMSE) dos modelos mostram valores da ordem de 0,552 m no receptor Ashtech (Figura 1a) e em torno de 0,30 m para os outros dois modelos (Figuras 1b e 1c). Esta magnitude de valores torna a aplicabilidade dos modelos reduzida, uma vez que erros desta magnitude não são desejáveis na maioria das aplicações para as quais se utilizam o posicionamento relativo estático. Em estudo realizado por ten CATEN et al. (2007), a qualidade dos modelos foi analisada apenas pelo coeficiente de determinação de 0,43. Os autores atribuíram este resultado a origem

FLOAT dos dados utilizados e a falta de uma relação entre a acurácia e combinações de tempo e distância, possivelmente a qualidade dos modelos gerados no estudo seja ainda inferior.

A Figura 2 traz as regressões para a precisão a partir dos modelos propostos para os três receptores. Os modelos propostos a partir dos dados oriundos de receptores Ashtech e Sokkia estimaram 96% e 93% dos valores para desvio padrão, respectivamente. O modelo gerado a partir de dados coletados com o receptor Topcon obteve um coeficiente de determinação de 0,73, podendo-se considerá-lo bom.

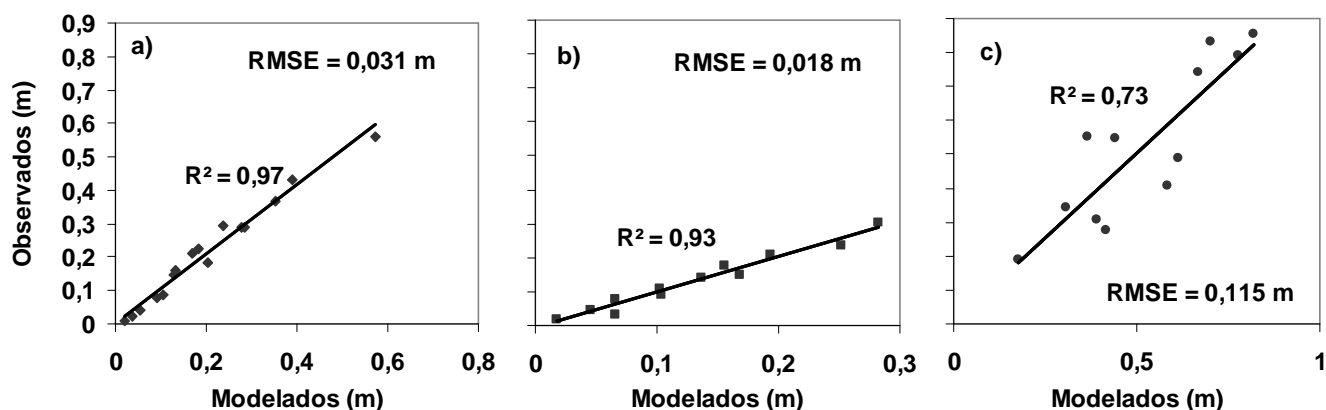


Figura 2 - Regressão entre valores modelados e observados para o desvio padrão a partir dos receptores Ashtech (a), Sokkia (b) e Topcon (c).

Quanto ao RMSE da precisão, valores em torno de 0,11 m foram encontrados quando da utilização do modelo gerado para o receptor Topcon (Figura 2c), indicando uma melhor aplicabilidade destes modelos em relação aqueles gerados para a acurácia (Figura 1), embora o conhecimento da precisão do levantamento não tenha nenhuma relação com valores ditos verdadeiros. Valores de RMSE da precisão menores do que 0,10 m foram observados nos dados dos outros dois equipamentos (Figura 2a e 2b). O desempenho das equações para a previsão da precisão pode ser explicado pela qualidade dos dados utilizados na geração dos modelos.

A possibilidade de modelar a precisão de um levantamento também já havia sido comprovada por ten CATEN et al. (2007). Contudo, os autores alertam para a importância de se compreender o significado estatístico da precisão. Sendo esta gerada apenas em função dos dados coletados, sem qualquer relação

com uma coordenada verdadeira, quanto maior o número de épocas coletadas menor será o desvio padrão do levantamento, não implicando, no entanto, em uma maior veracidade da coordenada final.

Tomando-se cada receptor como mais uma repetição do experimento desenvolveu-se um modelo único para acurácia e precisão do levantamento, Figuras 3a e 3b. Diferentemente das tabelas disponíveis em manuais e na literatura, que apresentam apenas faixas de tempo e distância, estes modelos são capazes de estimar a acurácia e precisão para uma variedade de combinações entre o período de ocupação do ponto e o afastamento entre os receptores. ANGULO FILHO et al. (2002) equacionaram o erro de posicionamento apenas em função do tempo de medição, tendo suas funções demonstrado que tempos maiores de rastreamento dos pontos conduziam a um posicionamento com menor erro.

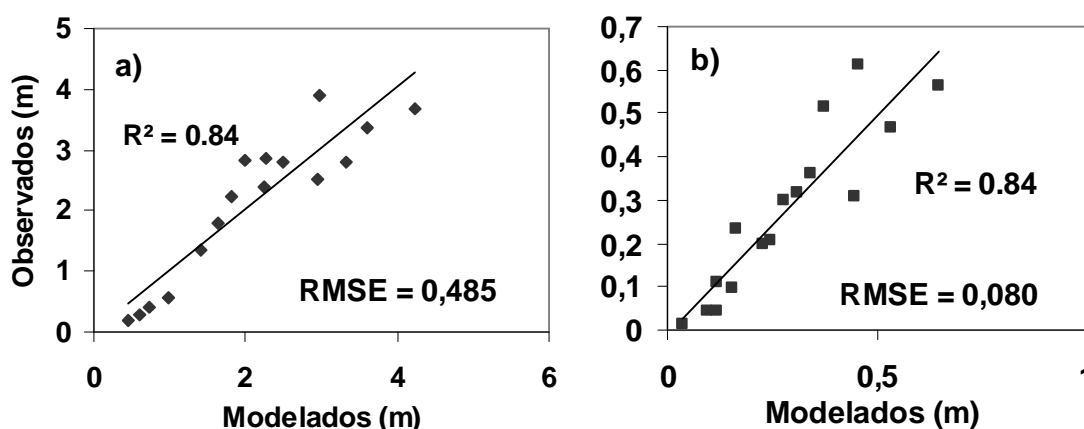


Figura 3 - Regressão entre valores modelados e observados para acurácia (a) e precisão (b).

O valor de RMSE de 0,485 m (Figura 3a) para o modelo de predição da acurácia em função dos valores de T e D, torna difícil a aplicação prática deste modelo.

Nas tomadas de coordenadas pelo posicionamento relativo estático, para a maioria as aplicações, estarão

sendo buscadas coordenadas com acurácia superior a este valor de erro padrão.

Contudo, uma finalidade prática para os modelos gerados seria a sua utilização didática como demonstram as Figuras 4a e 4b.

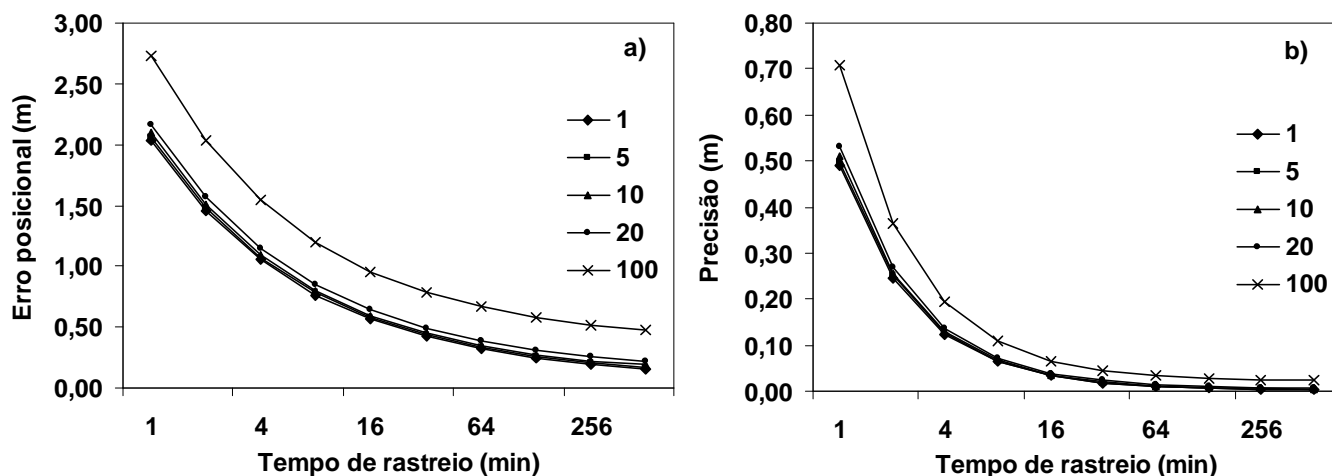


Figura 4 – Curvas geradas a partir dos modelos reunindo todos os dados dos três receptores para acurácia (a) e precisão (b). Valores internos (1; 5; 10; 20 e 100) indicam distâncias em km entre receptores.

Pelas formas das curvas verifica-se que tempos maiores de rastreo deverão ser utilizados para que maiores valores de acurácia e precisão sejam alcançados. As curvas também demonstram que na medida em que os receptores são afastados entre si, mais erros são adicionados especialmente em função da componente atmosfera, como pode ser observado pela diferença entre as distâncias até 20 km e 100 km entre receptores (Figura 4a).

A busca pela modelagem dos valores de acurácia e precisão realizados neste estudo deve ser melhor explorada, especialmente aplicando-se dados oriundos da solução do tipo FIXED das ambigüidades e receptores de dupla freqüência, os quais tornam-se cada vez mais acessíveis. Também as informações oriundas de soluções não inteiras das ambigüidades devem ser melhor estudadas, como reportado por MENZORI (2005) em 62% das medidas do tipo FLOAT a diferença em relação à coordenada verdadeira foi melhor do que 0,50 m. O autor demonstra que a solução FLOAT tem uma variabilidade associada as coordenadas finais, não sendo possível associar somente ao tempo de rastreo e ao comprimento da linha base como determinantes para a qualidade da coordenada quando temos este tipo de solução para as coordenadas. Estudos futuros de modelagem deverão buscar inserir no modelo outros fatores determinantes para a qualidade do posicionamento GPS como, por exemplo, a distribuição espacial dos satélites (DOP).

CONCLUSÕES

A partir dos resultados deste trabalho, pode-se afirmar que é possível a geração de modelos que

contemplem, simultaneamente, variáveis importantes para o planejamento de um levantamento a ser executado através da tecnologia GPS.

O erro padrão encontrado nos modelos de acurácia gerados a partir de dados oriundos da solução não inteira das ambigüidades, foi superior ao erro esperado em aplicações que se utilizem do levantamento estático relativo.

Os modelos gerados reproduzem o conhecimento preconizado pela literatura de que maiores tempos de rastreo são necessários na medida em que são maiores as distâncias entre receptores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO FILHO, R. A.; VETTORAZZI, C. A.; SARRIES, G. A. Exatidão de posicionamento de um receptor GPS, operando sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.325-331, 2002.

ARANA, J. M.; ISHIKAWA, M. I.; MONICO, J. F. G. A influência do Tempo de Rastreo e PDOP na Coleta de Dados GPS. In: 20 ANOS DE ENGENHARIA CARTOGRAFICA NA FCT/UNESP, Presidente Prudente. **Abstracts...**Presidente Prudente: UNESP, 1997, v.1, p.109-114.

CORSEUIL, C.W.; ROBAINA, A.D. Reconstituição de uma poligonal topográfica pelo sistema de posicionamento global. *Planimetria. Ciência Rural*, v.33, n.2, p.299-303, 2003.

GREENFELD J. S. How Long Must We Wait? The Duration of GPS Observations for Short Baselines

Measurements. **Surveying and Land Information Systems**, v. 63, n. 2, p. 77-86, 2003.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. 5. ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.

KRUEGER, C. P. Análise da degradação da precisão no posicionamento relativo GPS para linhas de base inferiores a 40 Km. In: II Colóquio brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2001. **Abstracts... UFPR**, 2001, v.1, p.164-165.

MENZORI, M. **Classificação da exatidão de coordenadas obtidas com a fase da portadora L1 do GPS**. 2005. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287p.

SANTOS, M. S. T.; SÁ N. C. DE. O uso do GPS em levantamentos geofísicos terrestres. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.24, n.1, p.63-80, 2006.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SILVA, N. C. C. da; SANTOS, M. C. dos; OLIVEIRA, L. C. de. Efeito da refração troposférica no posicionamento geodésico com GPS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.17, n.2-3, p.117-128, 1999.

SOKKIA, Stratus Operations Manual. USA. 2004. 138p.

ten CATEN, A.; BENVENUTO, D. J. C.; ROBAINA, A. D. Qualidade em levantamentos com GPS através a modelagem da acurácia e da precisão. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.13, n.2, p.251-256, 2007.