

Análise multitemporal do Posicionamento DGPS pós-processado

**Marcelo Soares Teles Santos
Eduardo Henrique Araújo
Anderson de Medeiros Souza
Alessandro Salles Carvalho
Francisco Pinheiro Lima Filho**

UFRN - Departamento de Geologia
59072-970 Natal RN
mstsantos@yahoo.com.br

Resumo: Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento temporal das coordenadas obtidas com DGPS por código, sob a influência da variação das principais fontes de erros sistemáticos temporais do sistema GPS, ou seja, a ionosfera e a geometria dos satélites. Para isso, foram utilizadas observações de uma linha base com 10 km de comprimento, coletadas durante cinco dias consecutivos e com taxa de amostragem de 5 segundos, nos quais foram obtidas 86.520 coordenadas UTM. Os RMS dos resíduos do conjunto de coordenadas *N*, *E* e *h* foram, respectivamente, de 0,385, 0,772 e 0,718 m, enquanto que os desvios padrões foram, respectivamente, de 0,250, 0,278 e 0,684 m. A partir das séries temporais horárias, verificou-se que as coordenadas sofreram uma variação temporal ao longo de cada dia e que este comportamento fora semelhante todos os dias. Os resultados obtidos foram, então, correlacionados aos principais efeitos temporais do sistema GPS.

Palavras chaves: GPS, DGPS, séries temporais.

Abstract: This work had as objective to study the temporal behaviour of coordinates obtained with DGPS by code under influences of variation of main sources of temporal systematic errors of GPS system, such as ionosphere and satellite geometry. For that, observations of a baseline with 10 km length were used. These observations were collected during 5 consecutive days, and with 5-second sampling in which 86,520 UTM coordinates were obtained. RMS of residues of *N*, *E* and *h* set coordinates were, respectively, 0.385, 0.772, and 0.718 m, while standards deviations were, respectively, 0.250, 0.278, and 0.684 m. Since temporal schedule series, it was verified coordinates suffered a temporary variation along days, and this behaviour was similar every day. Obtained results were correlated to main temporal effects of GPS system.

Keywords: GPS, DGPS, temporal series.

1 Introdução

Atualmente, as principais fontes de erros sistemáticos do sistema GPS são a ionosfera e a geometria dos satélites, as quais apresentam variação temporal ao longo do dia e das estações do ano. O efeito da ionosfera, o qual depende do conteúdo total de elétrons na camada, varia ao longo do dia e se repete no mesmo horário em dias consecutivos. O efeito da geometria dos satélites, o qual depende do movimento relativo dos satélites, também varia ao longo do dia e se repete em dias consecutivos praticamente no mesmo horário, com atraso de 4 minutos. Portanto, espera-se que, em um mesmo horário em dias consecutivos, as fontes de erros sistemáticos do sistema GPS sejam idênticas. Porém, não se sabe o comportamento das coordenadas quando submetidas a esses efeitos temporais.

Este trabalho tem o objetivo de estudar o comportamento temporal das coordenadas obtidas pelo método DGPS com a fase do código, sob a influência da variação das principais fontes de erros sistemáticos do sistema. Para isso, foram utilizadas observações de uma linha base com 10 km de comprimento,

coletadas durante 5 dias consecutivos, 24 horas por dia, e com taxa de amostragem de 5 segundos. O DGPS com a fase do código foi selecionado estrategicamente, pois, neste método, os erros sistemáticos temporais do sistema GPS não são totalmente removidos, possibilitando o estudo de seus efeitos no posicionamento.

As precisões das coordenadas N , E e h foram avaliadas pelas análises estatísticas de seus desvios em relação aos valores médios do conjunto de observações, enquanto as acurácias foram avaliadas pelas análises estatísticas de seus resíduos em relação aos valores de referência. Na análise do comportamento temporal, o conjunto de observações foi subdividido em séries temporais diárias e horárias, para as quais foram obtidas as estatísticas básicas. Os resultados obtidos foram então correlacionados aos principais efeitos sistemáticos temporais do sistema GPS.

Alguns trabalhos foram realizados anteriormente para a avaliação da acurácia do posicionamento DGPS (Ramos, 2007; Kawabata Neto, 2005; Soares, 2005; Prado, 2001; Briones, 1999). O presente trabalho apresenta a vantagem de investigar, além da acurácia e precisão da técnica DGPS, seu comportamento temporal ao longo do dia e dos dias.

2 Posicionamento diferencial

O posicionamento consiste na determinação da posição de objetos, estáticos ou móveis, na superfície terrestre ou em suas proximidades. Utilizando-se o GPS, o posicionamento pode ser absoluto, relativo ou diferencial (Monico, 2000; Hofmann – Wellenhof et al., 1994; Seeber, 1993; Leick, 1990).

2.1 Métodos diferenciais

O princípio básico do método diferencial consiste no posicionamento de uma estação móvel (*rover*), através de correções diferenciais geradas em uma ou mais estações de referência (bases) (Ramos, 2007; Kawabata Neto (2005); Soares (2005); Featherstone & Stewart, 2001; Prado, 2001). Neste método, o receptor da base mede a distância entre cada satélite e a estação base, com uso das observações GPS, e compara essa medida com a correspondente distância geométrica, em cada instante de tempo (a distância geométrica é calculada com uso das coordenadas da antena da base, conhecida, e das coordenadas de cada satélite, obtidas nas efemérides transmitidas). A diferença entre a distância observada e a geométrica corresponde ao erro de medida associado para cada satélite. Os valores dos erros das distâncias, calculados na estação base, são utilizados como correções para as distâncias observadas na estação *rover* (Kawabata Neto, 2005).

As correções na estação *rover* podem ser aplicadas em tempo real ou em pós-processamento. Em tempo real, elas são transmitidas da estação base para a estação *rover* através de *link* de rádio. Em pós-processamento, as observações das estações base e *rover* são armazenadas nos receptores GPS e posteriormente são transferidas para o computador, para serem processadas. As transmissões das correções em tempo real também podem ser realizadas através de sinais de telefonia celular, de internet ou por satélites artificiais; porém, possuem poucas aplicações devido aos altos custos e dificuldades operacionais.

Segundo Soares (2005), além das correções no domínio das medidas (distâncias), pode-se utilizar as correções nos domínios da posição e do estado espacial. No domínio da posição, as correções são calculadas a partir das diferenças entre as coordenadas obtidas no posicionamento GPS e as adotadas como referência, na estação base. No domínio do estado espacial, diversas estações da área de trabalho são usadas para estimar as imprecisões das medidas da estação *rover*.

As correções diferenciais podem ser geradas a partir de observações da fase do código, da fase do código suavizado pela fase da portadora, ou da fase da portadora. De acordo com Soares (2005), usando as observações da fase do código, a acurácia obtida é de 1 a 3 m, a qual depende da distância entre as estações base e *rover*; com uso das observações da fase do código suavizada pela fase da portadora, utilizando filtro adequado, a acurácia alcançada é melhor do que 0.5 m; e com uso das correções da fase da portadora (diferencial preciso), pode-se obter acurácia de poucos centímetros. Portanto, as técnicas diferenciais baseadas na fase da portadora possuem maior acurácia do que as que utilizam a fase do código, em função da maior acurácia das observações.

Na prática, tem-se empregado o termo DGPS (*Differential GPS*) para o posicionamento diferencial

realizado com correções de observações da fase do código ou da fase do código suavizado pela fase da portadora, em tempo real ou em pós-processamento. O termo RTK (*Real Time Kinematic*) é usado quando o posicionamento diferencial é realizado em tempo real com correções de observações da fase da portadora. Neste método, também podem ser transmitidas medidas brutas de fase da portadora; neste caso, o método pode ser chamado ainda de relativo em tempo real (Prado, 2001).

2.2 O método DGPS

Um receptor habilitado para operar DGPS em tempo real deve possuir um canal de recepção e transmissão de dados DGPS. O funcionamento da estação base DGPS geralmente é autônoma e contínua, e sua antena encontra-se em uma posição muito bem determinada, para monitorar o erro associado a cada satélite. Além dos erros obtidos em cada satélite, são transmitidas as informações sobre eventuais problemas nos satélites. Caso o erro de determinado satélite esteja fora de certos limites, a estação base pode considerar este satélite inadequado ao uso, não sendo utilizado nos cálculos.

No Brasil, a técnica DGPS com observações da fase do código pode ser empregada em tempo real a partir de uma rede de Estações de Referência DGPS (ERDGPS) baseadas em radiofaróis, que transmite correções diferenciais através dos sistemas de radionavegação, com o objetivo básico de melhorar a acurácia da navegação marítima em portos e canais de acesso. Segundo Ramos (2007), outras atividades como levantamentos hidrográficos e serviços de sinalização náutica têm utilizado estas estações para posicionamento horizontal. O Brasil possui uma rede constituída por 11 ERDGPS (Estações de Referência DGPS), localizadas nos principais portos do país, baseadas em radiofaróis operados pela Marinha do Brasil.

As técnicas diferenciais baseiam-se no fato de que, em um mesmo instante, algumas fontes de erros são semelhantes nas estações base e *rover*. Assim, os erros obtidos na estação base podem ser usados como correções na estação *rover*. Quanto menor a distância entre as estações, maior a correlação entre as fontes de erros nas estações, e mais preciso é o posicionamento. O aumento da distância entre as estações diminui a correlação entre as fontes de erros e gera uma degradação progressiva na qualidade do posicionamento. Assim, em regiões relativamente extensas, de centenas de quilômetros, o posicionamento DGPS utilizando apenas uma ERDGPS pode não ser o mais adequado, pois os erros obtidos são diretamente proporcionais à distância entre as estações base e *rover*.

Nesse contexto, foi desenvolvida a técnica SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), na qual o sistema de transmissão ocorre por meio de satélites geo-estacionários. Nesta técnica, estações de monitoramento localizadas na superfície da Terra calculam parâmetros que modelam os erros associados às medidas GPS em função da posição do receptor da estação *rover*. Os parâmetros são enviados para os satélites geoestacionários, os quais retransmitem os sinais para receptores habilitados, na mesma frequência dos satélites GPS.

A técnica SBAS foi implantada em alguns países. Por exemplo, pode-se citar o WAAS (*Wide Area augmentation system*), nos EUA, o EGNOS (*European GPS Navigation Overlay System*), na Europa, e o MSAS (*The Japan Civil Aviation Bureau's MTSAT Satellite Augmentation System*), no Japão. No Brasil, a principal empresa que opera o SBAS é a OMNISTAR. Porém, os custos do serviço ainda estão muito altos, inviabilizando seu uso para a maioria das aplicações.

Vale destacar que, as técnicas diferenciais cuja transmissão das correções são feitas a partir de antenas em solo, como o caso das ERDGPS da Marinha do Brasil, são chamadas de GBAS (*Ground Based Augmentation System*).

2.3 Fontes de erros

A distância medida entre um satélite e o receptor está sujeito a erros relacionados aos satélites, à propagação do sinal, ao receptor/antena e à estação (Monico, 2000). No entanto, no método DGPS, os dados recebidos pela estação *rover* permitem a eliminação de algumas fontes de erros de medidas associadas a cada um dos satélites.

Os erros relacionados aos satélites, tais como os das efemérides e dos relógios dos satélites, são iguais nos receptores base e *rover*, sendo removidos no método diferencial. Os erros relacionados com a propagação do sinal na atmosfera são dependentes do caminho percorrido pelo sinal, e são provocados principalmente pelas camadas da ionosfera e da troposfera. Quanto mais próximas forem as estações

base e *rover*, mais semelhantes serão os caminhos percorridos pelos sinais, ou seja, maior será a correlação dos erros e melhor removidos eles serão.

No entanto, os erros relacionados ao receptor são específicos e não podem ser eliminados no método diferencial; como exemplo, pode-se citar o erro do relógio do receptor e o erro do centro de fase da antena. Ainda, os erros relacionados com a estação dependem exclusivamente do local da estação, e também não podem ser eliminados com o método diferencial; como exemplo, pode-se citar o multicaminho e o erro nas coordenadas da base. Segundo Santos (2005), apesar desses erros não puderem ser eliminados no método diferencial, eles podem ser reduzidos com uso de procedimentos adequados na aquisição de dados.

3 Metodologia

Como apresentado na Introdução, para as análises propostas de acurácia, precisão e comportamento temporal das coordenadas obtidas no modo DGPS, foram processadas as observações de uma linha base com aproximadamente 10 km de comprimento, coletadas continuamente durante 5 dias consecutivos, 24 horas por dia, e com taxa de amostragem de 5 segundos.

3.1 Seleção da linha base

A linha base é formada por estações localizadas em Recife (PE), pertencentes a duas redes de monitoramento contínuo do GPS, a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GPS), e a SCNet (Rede GPS de monitoramento contínuo da Santiago & Cintra). As observações, coletadas entre os dias 15 e 19 de fevereiro de 2008, foram obtidos via internet, nos sites das redes GPS (www.ibge.gov.br e www.santiagoecintra.com.br). No processamento, a estação da RBMC foi adotada como base, e a estação da SCNet como *rover*.

Na estação da SCNet, o receptor utilizado foi o Pathfinder ProXR, da Trimble, de 12 canais L1 e precisão nominal de 1 m no pós-processamento com o código C/A. Na estação da RBMC, o receptor utilizado foi o 4000SSI da Trimble, de 12 canais L1/L2. O receptor da SCNet registrou observações com taxa de amostragem de 5 segundos, enquanto os da RBMC com taxa de 15 segundos. Os processamentos das observações foram realizados com o *software* PathFinder Office da Trimble, Versão. 4.0. Assim, quando necessário, o *software* realizou interpolação nas observações para processá-las simultaneamente com intervalo de 5 segundos.

3.2 Precisão das coordenadas

A precisão das coordenadas UTM obtidas no processamento de dados foi avaliada pela análise estatística de seus desvios em relação à média do conjunto de dados. Para cada observação (i), foram obtidos os desvios na abscissa (dE_i), na ordenada (dN_i) e na altitude geométrica (dh_i):

$$dE_i = E_i - E_m \quad (1)$$

$$dN_i = N_i - N_m \quad (2)$$

$$dh_i = h_i - h_m \quad (3)$$

onde, os subscritos i e m representam, respectivamente, o valor observado e o valor médio das observações.

O valor único representativo do conjunto de desvios das observações foi determinado pelo desvio padrão das observações, ou seja, a raiz quadrada do quadrado médio dos desvios, também conhecida como RMS (*Root Mean Square*) dos desvios. Os desvios padrões nas componentes E , N e h foram calculados, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$\sigma_{dE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dE_i^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{dN} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dN_i^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{dh} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dh_i^2} \quad (6)$$

O desvio padrão das coordenadas é uma medida estatística da magnitude das discrepâncias das observações em relação ao valor médio. Para a aplicação das equações de desvios padrões apresentadas, se considera que o conjunto de desvios representa a população total dos desvios.

3.3 Acurácia das coordenadas

A acurácia das coordenadas obtidas nos processamentos foi avaliada pela análise estatística de seus resíduos em relação às coordenadas de referência. Para cada observação (i), foram obtidos os resíduos na abscissa (ΔE_i), na ordenada (ΔN_i) e na altitude geométrica (Δh_i):

$$\Delta E_i = E_r - E_i \quad (7)$$

$$\Delta N_i = N_r - N_i \quad (8)$$

$$\Delta h_i = h_r - h_i \quad (9)$$

onde, os subscritos r e i representam, respectivamente, o valor de referência e o valor observado.

O valor único representativo do conjunto de resíduos das observações foi determinado pelo RMS (*Root Mean Square*) dos resíduos, ou seja, a raiz quadrada do quadrado médio dos resíduos. Os RMS dos resíduos nas componentes E , N e h são calculados, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$RMS_{\Delta E} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i^2} \quad (10)$$

$$RMS_{\Delta N} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i^2} \quad (11)$$

$$RMS_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \quad (12)$$

O RMS dos resíduos das coordenadas é uma medida estatística da magnitude das discrepâncias das coordenadas em relação aos valores de referência. Além dos RMS dos resíduos nos eixos ordenados, foi calculado o RMS dos resíduos da posição horizontal, pela seguinte equação:

$$RMS_{\Delta P} = \sqrt{RMS_{\Delta N}^2 + RMS_{\Delta E}^2} \quad (13)$$

3.4 Comportamento temporal das coordenadas

Para avaliar o comportamento temporal das coordenadas, o conjunto de observações foi subdividido em séries temporais diárias e horárias, para as quais foram calculadas as estatísticas básicas. A partir das análises estatísticas das séries diárias e horárias, se verificou a precisão e a acurácia das coordenadas obtidas ao longo do dia e dos dias consecutivos. Os resultados obtidos foram então correlacionados aos principais efeitos temporais do sistema GPS, ou seja, a ionosfera e a geometria dos satélites.

4 Resultados e análises

Nos 5 dias de observações, foram obtidas 86.520 coordenadas UTM (17.304 por dia).

4.1 Análise descritiva do conjunto de observações

As Tabelas 1 e 2 apresentam as medidas de posição e dispersão do conjunto de desvios (equações 1, 2 e 3) e de resíduos (equações 7, 8 e 9) da série temporal obtida nos 5 dias de observações, considerando o intervalo de confiança de 99% de probabilidade (3 sigmas).

TABELA 1 – ESTATÍSTICAS DOS DESVIOS DAS COORDENADAS

COORDENADA	N.DADOS	MÉDIA	D.P	MÍNIMO	MÁXIMO	AMPLITUDE
dN	84738	0,000	0,250	-0,790	0,791	1,581
dE	84738	0,000	0,278	-0,900	0,897	1,797
dh	84738	0,000	0,684	-2,147	2,147	4,294

TABELA 2 – ESTATÍSTICAS DOS RESÍDUOS DAS COORDENADAS

COORDENADA	N.DADOS	MÉDIA	RMS	MÍNIMO	MÁXIMO	AMPLITUDE
ΔN	84738	0,287	0,385	-0,503	1,078	1,581
ΔE	84738	-0,716	0,772	-1,616	0,181	1,797
Δh	84738	-0,115	0,718	-2,262	2,032	4,294

Como se observa na Tabela 2, as acurácias das coordenadas N , E e h , representada pelos RMS dos resíduos (equações 10, 11 e 12) foram, respectivamente, de 0.385, 0.772 e 0.718 m, e o RMS da posição horizontal, calculado pela equação (13), foi de 0.863 m. Os desvios padrões das coordenadas N , E e h , apresentados na Tabela 1, foram, respectivamente, de 0.250, 0.278 e 0.684 m. Portanto, o RMS da posição horizontal foi maior do que o RMS da coordenada vertical por um fator de 1.2. Porém, as maiores dispersões ocorreram na coordenada vertical, com fator de 2.5 em relação às coordenadas horizontais. Ainda, nas coordenadas horizontais, os maiores resíduos ocorreram em E , com fator de 2.5 em relação a N , e com praticamente a mesma dispersão.

Para identificar a distribuição de frequências que mais se aproximou do conjunto de observações, foram gerados os histogramas dos desvios das coordenadas, calculados pelas equações (1), (2) e (3). Os histogramas são apresentados nas Figuras 1, 2 e 3, nos quais se observa que as distribuições de frequências dos desvios se aproximam da curva normal. Nos histogramas, é possível visualizar, em termos relativos, a magnitude das dispersões das coordenadas horizontais em relação à coordenada vertical, com um fator de 2.5 vezes.

De acordo com os resultados, se verifica que a acurácia obtida com o DGPS por código está dentro das especificações técnicas do receptor GPS utilizado, ou seja, submétrico; esse resultado foi obtido em 99 % do tempo. Dessa forma, se conclui que, com apenas uma época de observação, pode-se obter acurácia métrica no posicionamento de feições topográficas, desconsiderando eventuais erros grosseiros no posicionamento. Apesar disso, no posicionamento de feições topográficas importantes, se recomenda o uso de sessões com mais de uma época, para eliminar os eventuais erros grosseiros e aumentar a confiabilidade do levantamento. Devido à boa acurácia e ao intervalo curto da sessão de observações, o DGPS pode ser considerado um método eficiente de aquisição de dados para diversas aplicações, tais como o cadastro técnico urbano e o rural, os sistemas de informações geográficas, além dos levantamentos topográficos.

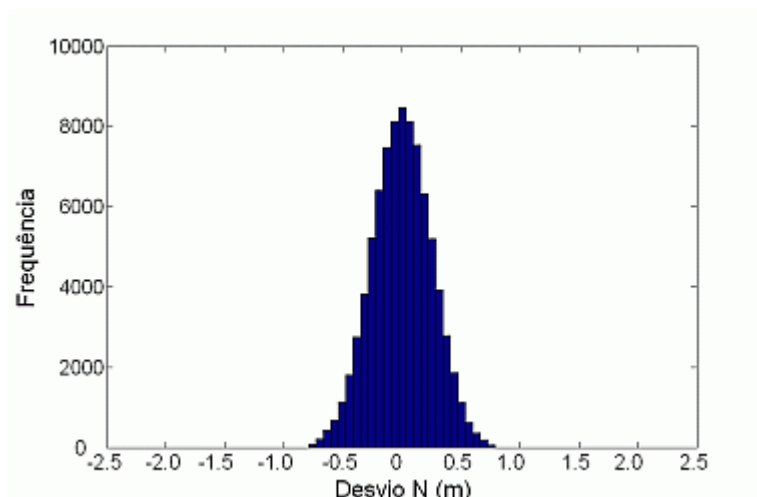


Figura 1 : Histograma dos desvios das ordenadas

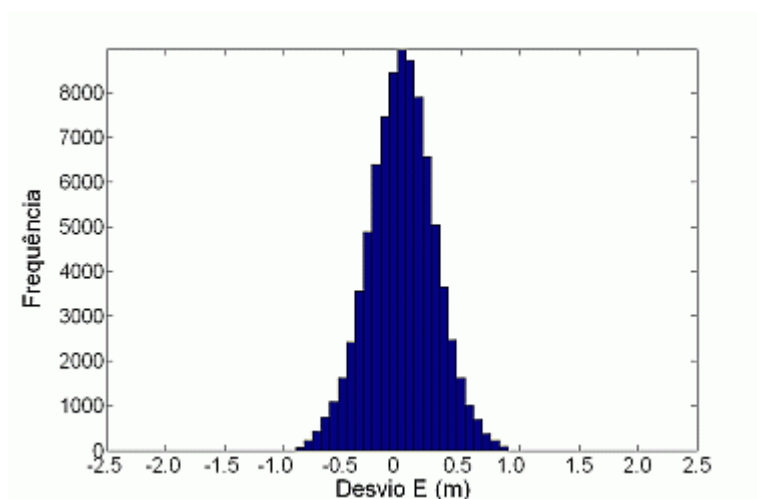


Figura 2 – Histograma dos desvios das abscissas

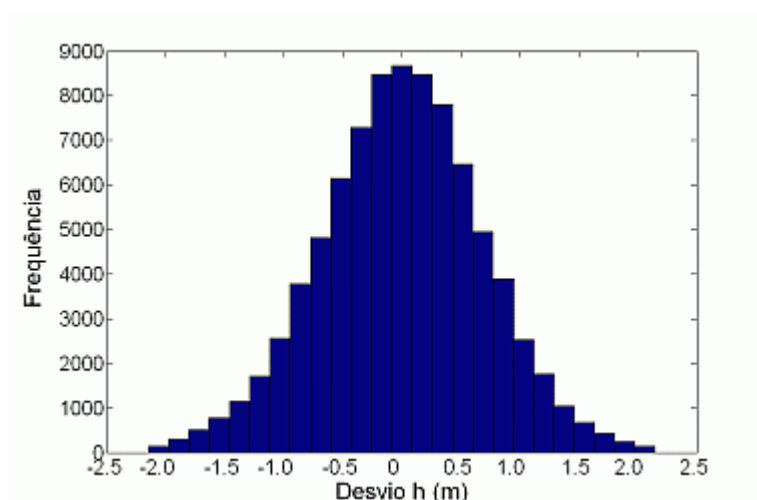


Figura 3 – Histograma dos desvios das altitudes

4.2 Análise gráfica do comportamento temporal das observações

O comportamento temporal das coordenadas foi avaliado pela análise gráfica dos comportamentos diários e horários, para os 5 dias de observações.

Comportamento diário das coordenadas

A Figura 4 apresenta as acurácias (RMS dos resíduos) das séries temporais diárias obtidas nos 5 dias de observações. A barra de erros indica a precisão das séries diárias (observar a escala de redução de 10 vezes nas barras de desvios padrões).

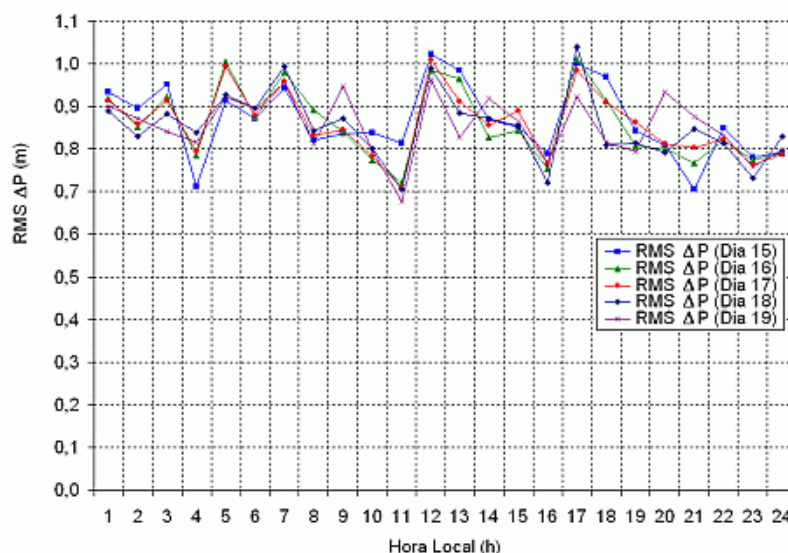


Figura 4 – RMS e desvio padrão das séries temporais diárias das coordenadas (OBS: barra de desvio padrão com escala de redução de 10 vezes)

A partir da Figura 4, percebe-se claramente que as séries temporais diárias apresentaram comportamento de séries estacionárias, nas quais, as propriedades estatísticas (média e desvio padrão) não mudam com o tempo, ou seja, não há tendências nas observações. Assim, se conclui que não ocorreu variação significativa das coordenadas obtidas em séries temporais diárias ao longo dos dias consecutivos, considerando o intervalo de 5 dias. Portanto, uma análise da variação temporal somente a partir de séries diárias poderia levar a conclusões equivocadas a respeito da variação das coordenadas ao longo do tempo, pois, se poderia concluir que a acurácia permaneceu constante durante o dia, devido ao valor diário médio ser estacionário nos dias consecutivos.

Ainda na Figura 4, se pode observar claramente os maiores resíduos obtidos em *E*, maiores em relação aos resíduos de *N* por um fator de 2. Segundo Santos (2005), isso se deve possivelmente devido ao movimento quase polar dos satélites, ou seja, na direção Norte-Sul, variando pouco na direção Leste-Oeste.

Comportamento horário das coordenadas

As Figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam as acurácias das séries temporais horárias obtidas durante os 5 dias de observações, respectivamente, em *P*, *h*, *N* e *E*.

A partir das Figuras 5, 6, 7 e 8, se verifica que as coordenadas sofreram uma variação temporal ao longo de cada dia, e que este comportamento foi semelhante em todos os dias. Ainda, para um mesmo horário em dias consecutivos, a acurácia foi praticamente igual, evidenciando um comportamento sazonal com periodicidade de aproximadamente 24 horas. A variação temporal indica que erros sistemáticos estão presentes nas observações, ou seja, que a técnica DGPS com a fase do código não modelou de maneira adequada os efeitos sistemáticos de caráter temporal.

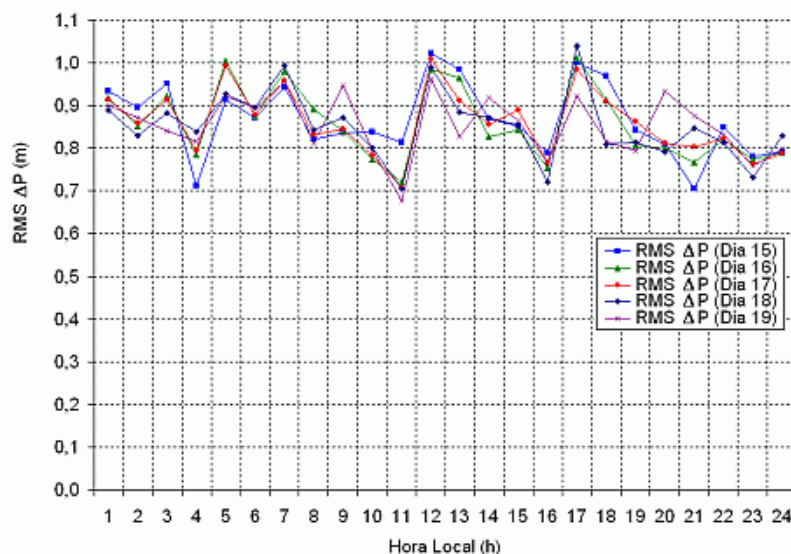


Figura 5 – RMS dos resíduos das séries temporais horárias da componente horizontal P

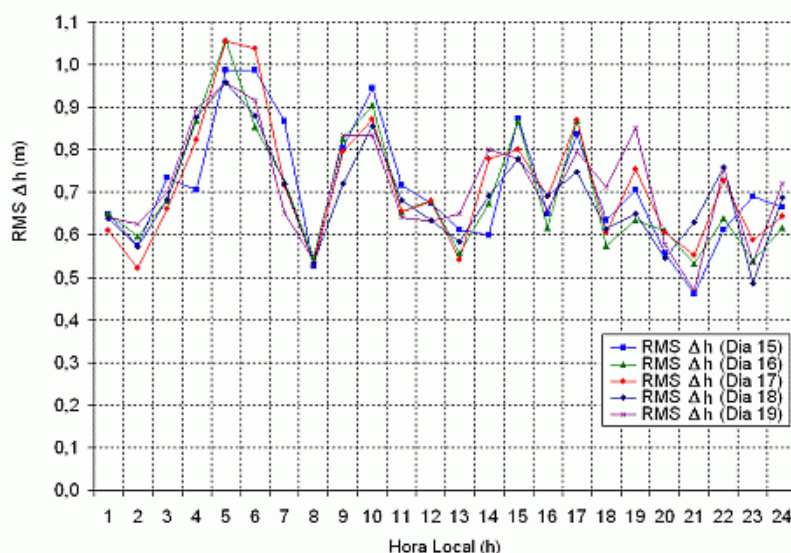


Figura 6 – RMS dos resíduos das séries temporais horárias na componente altimétrica h

No entanto, pequenas diferenças de acurácia podem ser notadas em um mesmo horário em dias consecutivos. Isso ocorreu porque, além da componente sistemática, as observações estão submetidas a uma componente residual, resultante do próprio ruído (ou precisão) do receptor. Porém, esta componente foi inferior à sistemática, pois não interferiu no comportamento temporal das coordenadas. A componente residual sempre se faz presente quando se realiza várias observações de uma determinada grandeza física, tal como as fases do código ou da portadora com receptores GPS. Ela faz com que os valores das observações flutuem em torno da média, a qual representa a magnitude dos erros sistemáticos (no caso de observações sem erros grosseiros).

A partir dos resultados obtidos conclui-se que, conhecendo o comportamento das coordenadas durante um dia de observações, e sabendo que o comportamento dos dias consecutivos serão semelhantes, pode-se tentar prever o comportamento das observações futuras. Esse pode ser um eficiente procedimento para a escolha dos melhores horários para o posicionamento, por usar o efeito combinado das diferentes fontes de erros sistemáticos temporais, e avaliar os efeitos reais das fontes de erros nas acurácias das coordenadas. Os métodos de planejamento de missão contidos nos softwares de processamentos de

dados GPS são realizados em função dos gráficos de DOP (Diluição da Precisão), determinados a partir do número de satélites e de suas posições relativas em relação à estação rastreadora.

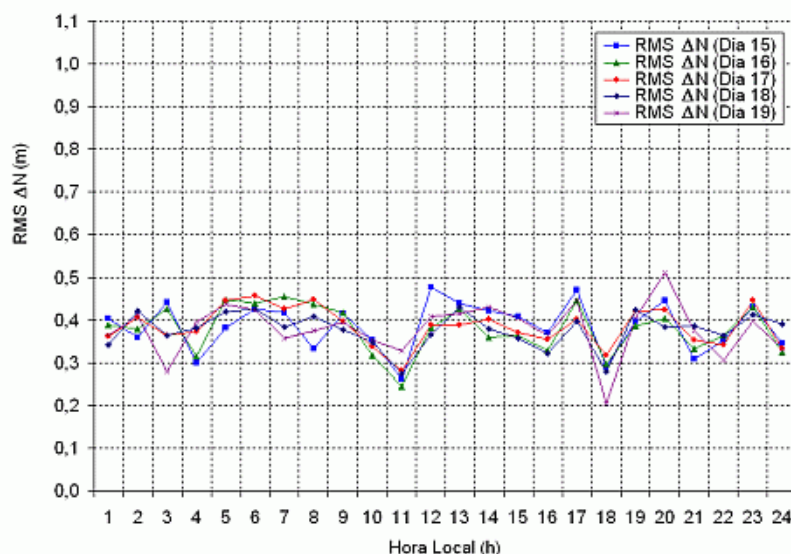


Figura 7 – RMS dos resíduos das séries temporais horárias na coordenada N

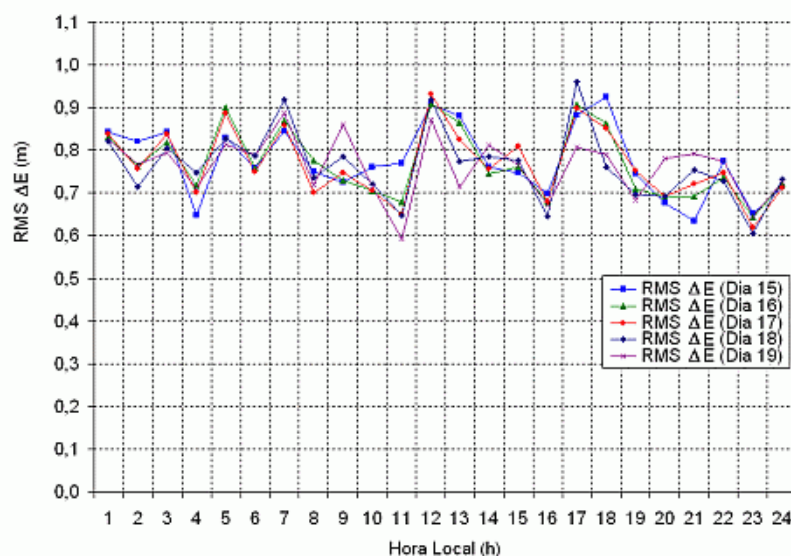


Figura 8 – RMS dos resíduos das séries temporais horárias na coordenada E

Como se observa na Figura 5, os resíduos horários da componente planimétrica variaram aleatoriamente ao longo do dia, em torno da média de 0,86 m, não apresentando um comportamento claramente tendencioso; porém, alguns picos horários podem ser observados. Em relação à componente altimétrica, apresentada na Figura 6, os resíduos horários apresentaram uma suave tendência de redução no fim do dia.

Comparando as médias das séries diárias (Figura 4) com as médias das séries horárias (Figuras 5, 6, 7 e 8) constata-se que, o aumento da sessão não necessariamente melhorou a acurácia das coordenadas, devido aos erros sistemáticos presentes nas observações, que não foram removidos com a técnica DGPS por código. No entanto, quanto maior a duração da sessão, maior a possibilidade de eliminação de erros grosseiros nas observações.

Correlação dos resultados com a ionosfera e a geometria dos satélites

A variação temporal das coordenadas ao longo do dia (idêntica nos dias consecutivos), e a repetição da acurácia num mesmo horário em dias consecutivos, podem ser explicadas pela análise das principais fontes de erros sistemáticos do sistema GPS, ou seja, da ionosfera e da geometria dos satélites. Como visto na Introdução, o efeito da ionosfera varia ao longo do dia e se repete no mesmo horário em dias consecutivos; e o efeito da geometria dos satélites também varia ao longo do dia e se repete em dias consecutivos praticamente no mesmo horário, com atraso de 4 minutos.

Nas Figuras 5, 6, 7 e 8, se observa picos horários de máximo e de mínimo nas acurácias das coordenadas, indicando discrepâncias em relação às outras médias horárias. Esses picos foram localizados principalmente em três intervalos de tempo: 04:00 às 05:00, 11:00 às 12:00, e 16:00 às 17:00. Os três intervalos foram associados à atividade ionosférica, pois, segundo Matsuoka & Camargo (2004), o Conteúdo Total de Elétrons (TEC) possui dois picos diários no Brasil, um de mínimo, aproximadamente entre 4:00 e 5:00 horas, e outro de máximo, por volta das 14:00 às 16:00 horas. Ainda, as discrepâncias obtidas no primeiro intervalo foram também associadas à má geometria dos satélites, através do gráfico de PDOP gerado para o dia 16/02/08.

5 Conclusões

A partir de observações de uma linha base com 10 km de comprimento, coletadas durante 5 dias consecutivos, 24 horas por dia, foi analisado o comportamento temporal das coordenadas obtidas pelo método DGPS por código, sob a influência da variação das fontes de erros sistemáticos temporais do sistema GPS. Para a análise do comportamento temporal, o conjunto de observações foi subdividido em séries temporais diárias e horárias, para as quais foram calculadas as acurácias e as precisões.

Nos 5 dias de observações, foram obtidas 86.520 coordenadas UTM (17.304 por dia). Como se observou na Tabela 2, os RMS dos resíduos das coordenadas *N*, *E* e *h* foram, respectivamente, de 0.385, 0.772 e 0.718 m. Os desvios padrões das coordenadas *N*, *E* e *h*, apresentados na Tabela 1, foram, respectivamente, de 0.250, 0.278 e 0.684 m. De acordo com os resultados, se verifica que a acurácia obtida com o DGPS por código esteve dentro das especificações técnicas do receptor GPS utilizado, ou seja, submétrico; esse resultado foi obtido em 99 % do tempo. Assim, conclui-se que o DGPS por código pode ser considerado um método eficiente de aquisição de dados para diversas aplicações, tais como o cadastro técnico urbano e o rural, os sistemas de informações geográficas, além dos levantamentos topográficos.

A partir da Figura 4, se percebeu claramente que as séries temporais diárias apresentaram comportamento de séries estacionárias, nas quais, as propriedades estatísticas (média e desvio padrão) não mudam com o tempo. A partir das Figuras 5, 6, 7 e 8, se verificou que as coordenadas sofreram uma variação temporal ao longo de cada dia, e que este comportamento foi semelhante em todos os dias. Ainda, para um mesmo horário em dias consecutivos, a acurácia foi praticamente igual, evidenciando um comportamento sazonal com periodicidade de aproximadamente 24 horas. Portanto, se conclui que, conhecendo o comportamento das coordenadas durante um dia de observações, pode-se utilizar estas informações para o planejamento do levantamento de campo.

Nas Figuras 5, 6, 7 e 8, se observou 3 picos horários de máximo e de mínimo nas acurácias das coordenadas, indicando discrepâncias em relação às outras médias horárias. Esses picos foram localizados principalmente em três intervalos de tempo: 04:00 às 05:00, 11:00 às 12:00, e 16:00 às 17:00. Os três intervalos foram associados à atividade ionosférica, e o primeiro intervalo foi também associado à má geometria dos satélites.

A partir dos resultados, foi possível comprovar, na prática, que coordenadas observadas no mesmo horário em dias consecutivos possuem a mesma acurácia. Porém, a tendência é que esse comportamento se altere ao longo do ano, pois, para um determinado horário do dia, as fontes de erros sistemáticos do sistema GPS variam com o decorrer dos dias. Isso ocorre porque a geometria dos satélites se repete todo dia com atraso de 4 minutos; portanto, com o avanço dos dias, a diferença na geometria se torna considerável. Ainda, a ionosfera também varia durante o ano para uma determinada estação fixa na Terra, devido ao movimento de Translação da Terra. Com isso, a tendência é que o comportamento das séries temporais diárias não seja estacionário durante o ano. Portanto, em trabalhos futuros, recomenda-se comparar os resultados obtidos em diferentes épocas do ano.

6 Referências Bibliográficas

- Briones, A. B.:** *Análise do posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS implantadas no litoral brasileiro*, Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 1999.
- Featherstone, W. E. & Stewart, M. P.:** *Combined analysis of Real-Time Kinematic GPS equipment and its users for height determination*. Journal of Surveying Engineering . Vol 127: 31-51, 2001.
- Kawabata Neto, M.:** *Utilização do modulo “Creatalink” para a transmissão, em tempo real, de sinais de correção para sistemas GPS diferenciais (DGPS)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica (USP-EESC). 101 f, 2005.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H. & Collins, J.:** *GPS: Theory and practice*. Springer – Verlag Wien, N. York, 355 f, 1994.
- Leick, A.:** *GPS Satellite Surveying*. Jhon Wiley & Sons, Inc., N. York, 352 pp, 1990.
- Matsuoka, M. T. & Camargo, P. O.:** *Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira*. Revista Brasileira de Cartografia n° 56/01, 2004.
- Monico, J.F.G.:** *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora Unesp, 287 f, 2000.
- Prado, A.:** *Análise da Acurácia e da Correlação Espacial nas Técnicas DGPS e RTK*. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 142 f, 2001.
- Ramos, A. M.:** *Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso*. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Paraná, 2007.
- Santos, M.S.T.:** *Potencialidades do GPS em levantamentos geofísicos terrestres*. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Geofísica do IAG-USP, São Paulo, 140 f, 2005.
- Seeber, G.:** *Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications*. Walter de Gruyter, New York, 531 f, 1993.
- Soares, W. S.:** *Investigação de uma modelagem matemática como alternativa para aumento da área de cobertura de estações de referência DGPS*. Tese de Doutorado. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Paraná, 2005.