

DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS USANDO GPS EM ÁREAS COSTEIRAS

Factors Affecting the Precision of GPS in Coastal Areas for Determination of Vertical Displacements

Sylvana Melo dos Santos¹
Verônica Maria Costa Romão²
Gerd Günter Seeber³
Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral⁴

¹**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**
Centro Acadêmico do Agreste
Rodovia BR-104, Km 62, Nova Caruaru, 55002-970 – Caruaru, PE, Brasil.
sylvana@ufpe.br

²**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**
Departamento de Engenharia Cartográfica
Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901 – Recife, PE, Brasil.
vcosta@ufpe.br

³**Universität Hannover**
Institut für Erdmessung
Schneiderberg 50, D-30167 - Hannover , Alemanha.
seeber@ife.uni-hannover.de

⁴**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**
Departamento de Engenharia Civil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901 – Recife, PE, Brasil.
jcabral@ufpe.br

RESUMO

Diversas análises geotécnicas, tais como recalque e análise de subsidência, demandam um monitoramento rigoroso e preciso das altitudes ou dos deslocamentos verticais. O sistema GPS é um método muito útil na determinação da posição de um ponto na superfície do solo e já vem sendo utilizado para determinação de coordenadas verticais em várias aplicações da engenharia civil em diversas localidades no mundo. Em regiões costeiras, as redes de referência para o monitoramento são implantadas em apenas um dos lados dos pontos de medição, acarretando maiores dificuldades no uso do GPS e tornando-se necessário um estudo mais aprofundado e um planejamento detalhado para se obter a precisão desejada. O desempenho satisfatório dessa tecnologia para se obter alta precisão nas coordenadas verticais exige alguns condicionantes, relacionados aos satélites e às transmissões dos sinais. O presente artigo discute a aplicabilidade do GPS na detecção de pequenos deslocamentos verticais, considerando a influência do intervalo de tempo de observação, do número de estações de referência e do comprimento da linha de base nos resultados, com relação a um valor tomado como deslocamento real.

Palavras-chave: GPS, Posicionamento de Precisão, Deslocamentos Verticais, Áreas Costeiras.

ABSTRACT

Several geotechnical studies such as foundation settlement and soil subsidence require a careful and precise monitoring of altitudes and vertical displacements. GPS is a powerful system for determining point positions on terrain, and it has already been used for civil engineering in several countries for high precise determination. In coastal regions, there are

reference networks only at one side of the objects points with unknown vertical displacements what makes the situation more difficult and requires a deep study and a careful planning of GPS use to reach the desired precision. A suitable performance of GPS measurement for obtaining height with good precision depends on a few issues related to satellites and signal transmission. This paper presents a discussion on high precision GPS measurements for small vertical displacements taking into account the observation time span, the amount of reference stations and baseline influence on the results, regarding displacements that was considered real amount.

Keywords: GPS, precise positioning, vertical displacements, coastal areas.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) disponibiliza aos seus usuários uma tecnologia de posicionamento que combina economia, contínua disponibilidade e elevada precisão. Essas características atendem às exigências operacionais em diversas atividades, e ampliam seu uso no estabelecimento de redes geodésicas de controle, no monitoramento e engenharia, na determinação de altitudes, na geodinâmica, nos levantamentos cadastrais, na navegação de precisão, entre outros. Conforme o objetivo do levantamento, a precisão requerida, a quantidade e o tipo de receptores disponíveis e as condições logísticas de execução, diferentes estratégias de observação podem ser utilizadas quando se aplica a tecnologia GPS.

No caso da implementação de uma rede de referência para o monitoramento de deslocamentos verticais, a quantidade de estações (receptores), o tempo de observação e as distâncias entre essas estações aos pontos de medição são aspectos fundamentais na aplicação da tecnologia GPS para esse fim, dos quais dependem as estratégias de processamento na obtenção de coordenadas precisas (Santos e Romão, 2000). Isso só pode ser garantido, entretanto, quando as redes GPS de referência são referenciadas em pontos de coordenadas conhecidas previamente com alta precisão.

As redes geodésicas que atendem ao objetivo especial de monitoramento de deformações devem ser de tal forma que as variações geométricas esperadas nos pontos de medição possam ser estimadas mesmo quando essas deformações são ainda pequenas, no estágio inicial do monitoramento. Na prática, esses pontos de referência podem ser obtidos de campanhas GPS realizadas anteriormente, ou de uma rede terrestre precisa (as redes de controle nacionais), como a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC), por exemplo.

No presente estudo, os resultados obtidos indicam que é possível utilizar a tecnologia GPS como instrumento de detecção de pequenos deslocamentos verticais com um desempenho satisfatório que garante a sua aplicabilidade no monitoramento de subsidência e outros problemas práticos de engenharia que envolvam rebaixamento de solo ou acompanhamento de deslocamentos em edificações.

2. EMPREGO DO GPS NA DETECÇÃO DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS

2.1 Aspectos Gerais

As técnicas de nivelamento têm sido utilizadas tradicionalmente para o monitoramento rigoroso e preciso das altitudes ou diferenças de altitudes dos deslocamentos verticais de pontos na superfície da Terra. Essas técnicas podem, entretanto, apresentar dificuldades de operação em áreas urbanas com uma densa concentração de edificações, onde a linha de visada fica interrompida por prédios, árvores, postes e até mesmo transeuntes e automóveis ou, em localidades sujeitas à subsidência generalizada, onde não se dispõe de uma referência de nível nas proximidades da região de estudo.

Nos últimos anos, a tecnologia GPS vem sendo utilizada em levantamentos híbridos com as operações geodésicas tradicionais, ou mesmo em substituição a essas técnicas, nas mais diversas aplicações da engenharia, principalmente na determinação de altitudes de pontos na superfície da Terra.

Dentre os problemas de rebaixamento de solo que ocorrem em áreas altamente urbanizadas pode-se relacionar: recalques em edificações, recalques em pavimentos e subsidência do solo.

Em muitas localidades no mundo, tem-se aplicado o GPS para fins de monitoramento de deslocamentos verticais (Schaal e Larocca, 2002; Schaal, 2009; Ogaja, 2007; entre outros). No caso do monitoramento da subsidência resultante do bombeamento intensivo, por exemplo, o GPS foi empregado por vários pesquisadores: Sneed et al. (2002), Sneed et al. (2003), Abidin et al. (2001), Chang (2000), Sato et al. (2003), Bitelli et al. (2000), entre outros.

De acordo com Mousavi et al. (2001), as vantagens do emprego do GPS para realização desse tipo de estudo estão associadas aos custos, ao tempo e a precisão factível de ser obtida. Segundo os autores, o maior benefício direto é a economia de trabalho, em uma taxa próxima de 6:1, quando comparada com o uso das técnicas convencionais de levantamento. Outras vantagens do emprego da tecnologia GPS sobre os métodos convencionais dizem respeito à eficiência na coleta e automação dos dados e à dispensa da intervisibilidade entre os pontos levantados. Por esse motivo, o sistema GPS vem se consolidando, cada vez mais, como uma ferramenta muito útil e eficiente na determinação de coordenadas precisas.

Entretanto, o uso efetivo dessa tecnologia, e o real aproveitamento de sua potencialidade, com vistas a obter alta precisão nas coordenadas verticais exige a consideração de algumas condicionantes, que devem ser cuidadosamente observadas.

2.2 Detecção de deslocamentos verticais em áreas costeiras

Dentre as três coordenadas determinadas a partir do sistema GPS, a altitude geométrica destaca-se por uma maior sensibilidade a algumas influências de erro na sua determinação. As fontes de erro que mais interferem na determinação da altitude geométrica, exercendo um efeito condicionante sobre a sua precisão, são, principalmente, a configuração geométrica dos satélites, as refrações ionosférica e troposférica, e a variação no centro de fase da antena. Sobre os efeitos dessas fontes de erro, Menge (2003) resumiu os valores associados aos respectivos erros. A forma como esses erros são minimizados depende de algumas circunstâncias operacionais decisivas no posicionamento com GPS, tais como: comprimento da linha de base, duração da observação, disponibilidade de dupla frequência, número de estações envolvidas, quantidade de satélites rastreados e da configuração dos satélites. Como a altitude obtida com GPS é uma quantidade puramente geométrica, ou seja, não relacionada ao campo de gravidade da Terra (altitudes ortométricas ou altitudes normais), as análises de variação de altitudes podem ser conduzidas satisfatoriamente com base na repetição das medições GPS, isto é, sobre diferenças de altitudes.

Quando a densidade das estações de referência GPS é alta, pode-se obter altitudes elipsoidais com acurácia no nível do centímetro, mesmo para distâncias até várias dezenas de quilômetros entre as estações (Seeber 2003).

No entanto, em áreas costeiras as estações com receptores não podem ocupar a área onde está o mar, de modo que existirão pontos de referência apenas em um dos lados dos pontos a determinar, acarretando maiores dificuldades no uso do GPS para detecção de pequenos deslocamentos verticais com alta precisão. Sob tais condições torna-se necessário um estudo mais aprofundado e um planejamento detalhado para se obter a precisão desejada.

No que se refere ao Brasil, a zona costeira brasileira possui uma extensão aproximada de 9200 km, sendo uma área amplamente ocupada desde o período da colonização e concentra uma parcela significativa da população. A excessiva urbanização leva à dificuldade de intervisibilidade entre os pontos que compõem os vértices da rede de um levantamento, o que confirma a necessidade do emprego da técnica GPS nestas localidades.

A maior parte da região costeira brasileira, formada por camadas geológicas do tipo sedimentar, constitui um ambiente naturalmente instável e que está sujeito a modificações constantes de ordem natural, como a mobilização de grandes quantidades de sedi-

mentos e a elevação gradual do nível do mar. Além disso, as ações antrópicas nessas áreas são muito intensas e devem ser levadas em consideração, uma vez que as áreas costeiras estão passando por um processo de degradação que compromete ainda mais a estabilidade destas áreas como aporte de pontos de referência. Um agravante para essas áreas é o excessivo exploração dos recursos hídricos subterrâneos, como acontece na cidade de Recife, capital de Pernambuco, Brasil (Cabral et al., 2000).

Com o objetivo de verificar a adequação do sistema GPS no que se refere à detecção de deslocamentos verticais de pequena magnitude com referência à comparação de coordenadas verticais obtidas em épocas distintas (diferenças de altitudes), Santos (2005) realizou um experimento em que tais deslocamentos foram simulados. A partir da comparação entre os deslocamentos “detectados” e os deslocamentos simulados foi possível verificar o desempenho da tecnologia no que se refere à acurácia (tendência e precisão), bem como investigar a sensibilidade dos mesmos sob diversas circunstâncias operacionais de tempo de observação, de número de estações de referência e comprimento da linha de base.

3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

3.1 Metodologia

O experimento, realizado no teto de medições da Universidade de Hannover na Alemanha, entre 10 e 21 de setembro de 2004, consistiu no levantamento estático com coleta de dados contínua de duas antenas GPS, denominadas de msd1 e msd2, com uma sessão mínima de 48 horas. As antenas foram instaladas sobre dois pilares de concreto sobre o prédio, com pouco ou nenhum obstáculo para recebimento do sinal do satélite. Neste evento, obteve-se uma grande quantidade de sinais. Os receptores utilizados no teto de medições foram ASHTECH – modelo Z-XII, que possui duas frequências. As antenas permaneceram montadas sobre dois pilares considerados estáveis, Figura 1, separados por uma distância de aproximadamente 8m. Simultaneamente a essas medições, observações de sete estações de referência, localizadas ao redor de Hannover, de uma rede de rastreamento GPS permanente foram também consideradas nos processamentos. Estas estações estiveram afastadas do teto de medições numa distância máxima de 44 km.

Para simulação do movimento, para baixo, experimentado por uma antena GPS como nas aplicações da engenharia que necessitam do monitoramento do rebaixamento de solo, foram realizadas observações com a antena msd2 em cinco posições diferentes, que simulam, nesse experimento, a realização de medições em cinco épocas distintas. Para isso foram utilizados anéis de metal de tamanhos conhecidos, tal que o somatório dos anéis conferiu à antena uma altura de 11,8cm.



Fig. 1 - Foto do teto de medições do Institut für Erdmessung da Universidade de Hannover, com as antenas msd1 e msd2 (distância de aproximadamente 8m).

Após a coleta de dados da primeira sessão, com todos os anéis compondo a base da antena, retirou-se o primeiro anel com 8,3cm de altura e iniciou-se, então, a segunda sessão. Ao final do período observado retirou-se o anel com 1cm de altura e iniciou-se a terceira sessão. O procedimento foi repetido mais duas vezes retirando-se os anéis de 0,5cm e 2cm, e realizando-se respectivamente a quarta e a quinta sessão. As diferenças de altitude entre as posições experimentadas pela antena msd2 estão apresentadas na Figura 2. A antena msd1 permaneceu na mesma posição durante todo o experimento.

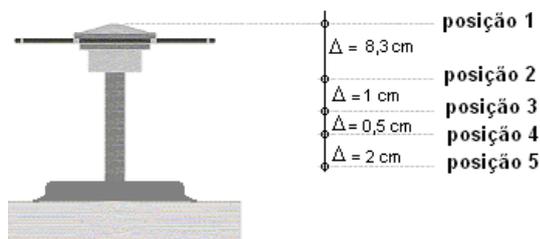


Fig. 2 - Variação da altitude da antena msd2 para simulação do rebaixamento do solo.

Todos os processamentos foram realizados com os programas GEONAP e GNPNET (GEOPP, 2000 e Wübbena, 1989), em que as soluções resultantes utilizadas foram do tipo *Fixed Solution* ou *Float Solution*, dependendo do comprimento da linha de base e do tempo de observação (para linhas de base acima de 30km e tempo de observação acima 12 hs a solução utilizada foi do tipo *Float*). Na resolução das ambigüidades (*Fixed Solution*) a combinação linear das portadoras que se mostrou mais eficiente foi a denominada Lx, que é uma combinação de todas as combinações lineares das observáveis (L_1 , L_2 , Wide lane, Narrow lane) no mesmo processamento. A solução tipo *Float* foi obtida com o sinal livre de ionosfera, denominado L_0 (ou L_3), o qual não é relacionado a ambigüidades inteiras, não sendo portanto um sinal adequado para soluções precisas.

3.2 Estações de referência utilizadas

Para análise da influência da quantidade e disposição das estações de referência foram processadas as observações de todas as estações envolvidas, considerando-se fixas as coordenadas das sete estações pertencentes à rede alemã SAPOS (localizadas em Hannover, Alfed, Hameln, Hildesheim, Schwarmstedt, Nienburg e Celle – Figura 3).



Fig. 3 - Estações de referência localizadas no Estado da Niedersachsen (Alemanha).

As estações de referência estavam localizadas a diferentes distâncias da estação móvel (Figura 4) e foram utilizadas diferentes estratégias para investigação sobre as estações de referência da rede SAPOS observadas:

Estratégia 1: todas as estações foram consideradas de referência, a qual foi denominada de 7R (Figura 5a).

Estratégia 2: três estações foram consideradas de referência e denominada de estratégia 3R (Figura 5b).

Estratégia 3: duas estações foram consideradas referência e denominada de estratégia 2R (Figura 5c).

Estratégia 4: apenas uma estação foi considerada de referência, com denominação de estratégia 1R (Figura 5d).

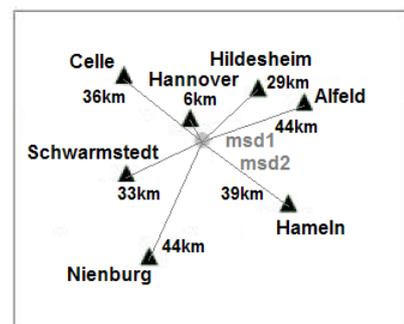


Fig. 4 – Esquema com as distâncias entre os pontos móveis, msd1 e msd2, e as estações de referência utilizadas.

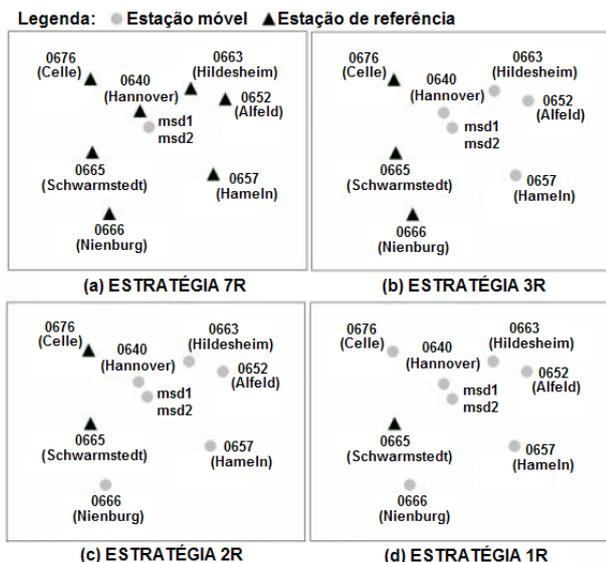


Fig. 5 – Distribuição das estações consideradas nas estratégias 7R, 3R, 2R e 1R, onde R indica Estações de referência.

3.3 Investigação sobre a quantidade de estações usadas como referência

Para análise da influência da quantidade de estações usadas como referência na detecção de deslocamentos e simular a disposição de estações de referência de acordo com o que pode ser observado numa região costeira qualquer, as estações escolhidas nas estratégias 3R, 2R e 1R (Figuras 5b, 5c e 5d) estão localizadas à esquerda do ponto monitorado, simulando uma situação onde à direita encontra-se o mar, tal como nas Figuras 6a, 6b e 6c.

A análise dos resultados foi precedida da definição de uma solução padrão para verificação da acurácia das coordenadas obtidas. Os resultados de referência que compõem as coordenadas da solução padrão - coordenadas, variâncias e covariâncias - foram obtidos do processamento em que todas as observações e estações do experimento (estratégia 7R) foram utilizados, garantindo a obtenção de coordenadas de referência com valores de desvio padrão menores que 5 mm.

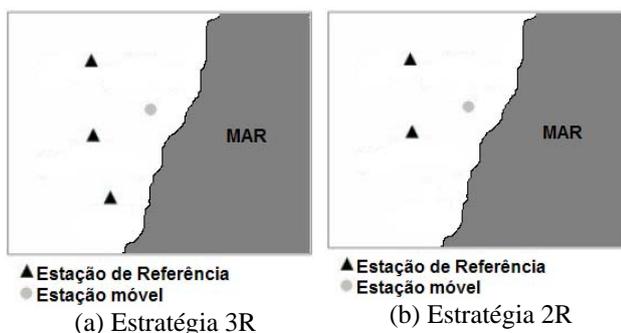


Fig. 6 – Disposição das estações de referências consideradas nas estratégias 3R, 2R e 1R, simulando o levantamento em área costeira.

Para cada uma dessas situações investigou-se o comportamento em levantamentos com durações bem distintas: 4, 12 e 24 horas. Assim sendo, verificou-se que a variação no número de estações de referência pode alterar a acurácia das coordenadas verticais, principalmente com curtos períodos de observação.

Com o emprego de apenas uma estação de referência essa variação é bastante evidente. Em termos numéricos isso significou que, enquanto que para um período de observação de 24 horas a discrepância média na altitude é da ordem de 3 mm, a redução desse período para 4 horas provoca uma degradação, com relação ao valor considerado real, em termos de valores médios, da ordem de 1 cm, conforme pode-se verificar na Tabela 1.

Tabela 1 – Discrepâncias na altitude com relação à solução padrão, em cm.

Quantidade de estações	Período de observação	Discrepância média em relação à solução padrão (cm)	Desvio padrão (cm)
7	24 horas	0.3	1.3
	12 horas	0.5	1.6
	4 horas	0.8	2.7
3	24 horas	0.5	1.4
	12 horas	1.1	1.5
	4 horas	1.1	2.7
2	24 horas	0.3	1.4
	12 horas	0.7	1.4
	4 horas	0.9	2.6
1	24 horas	0.3	1.4
	12 horas	0.9	1.5
	4 horas	0.7	1.7

Essa mesma alteração na ordem de grandeza da discrepância pôde ser observada nos demais resultados considerando as diferentes estratégias utilizadas. A diferença entre a discrepância, em valores médios, observada com o emprego da estratégia 3R e as demais estratégias, para um período de 24 horas, foi de 2mm. Este valor, entretanto, pode ser associado ao ruído inerente ao sistema.

Pode-se concluir, portanto, que é possível obter coordenadas verticais com discrepâncias milimétricas, e desvio padrão de poucas unidades de centímetros, mesmo com o emprego de apenas uma estação de referên-

cia, desde que os resultados sejam coletados por longos períodos de observação.

Com relação à precisão das observações, verificou-se um aumento nos desvios padrão da altitude com a redução no número de estações de referência (Figura 7) para um período de 24 horas de observação.

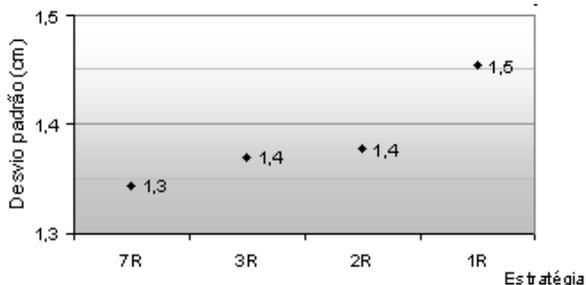


Fig. 7 – Desvio padrão médio do ajustamento com diferentes quantidades de estações de referência.

Independente da quantidade de estações de referência, para um período de observação de 24 horas, foi possível detectar deslocamentos verticais da ordem de 2 cm com uma tendência da ordem de 5 mm e precisão de 1.1 cm. Apesar de ter-se observado discrepâncias inferiores a 5 mm na detecção de deslocamentos menores que 2 cm, este fato não se repetiu nos demais resultados, para esse período de observação (Figura 8).

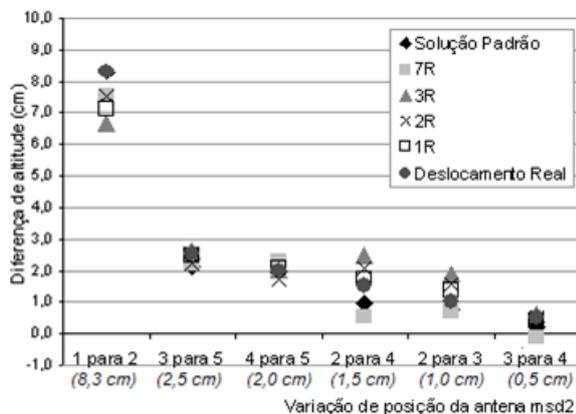


Fig. 8 – Diferenças de altitudes da antena msd2 obtidas para as diferentes estratégias, com 24 horas de observação.

3.4 Análise em função da distância da estação móvel até a estação de referência

A partir do processamento isolado de cada linha de base formada por uma estação de referência e o ponto ocupado pela antena msd2, foi possível investigar a influência do comprimento dessa linha de base sobre as altitudes obtidas. Neste contexto, a Figura 9 mostra a discrepância nas coordenadas verticais com relação à solução padrão, e pode-se observar que os valores tornam-se mais afastados do valor real quanto maior a distância da estação de referência.

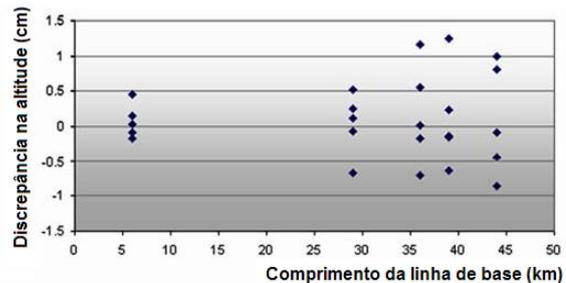


Fig. 9 – Discrepância na altitude entre a solução padrão e o processamento de diferentes comprimentos de linhas de base, com 24 horas de observação.

Analisando os valores de desvio padrão (Figura 10), não se verifica uma tendência de crescimento com o aumento no distanciamento da estação de referência. Em valores médios, o desvio padrão da altitude foi da ordem de 1.5cm.

Mesmo com o emprego de estações de referências distantes (acima de 20 km) foi possível detectar a ocorrência de deslocamento vertical em um ponto de observação. Por outro lado, aconteceu de linhas de base mais longas apresentarem deslocamento detectado maior que o deslocamento provocado, como foi o caso das estações com mais de 29 km de distância – Tabela 2.

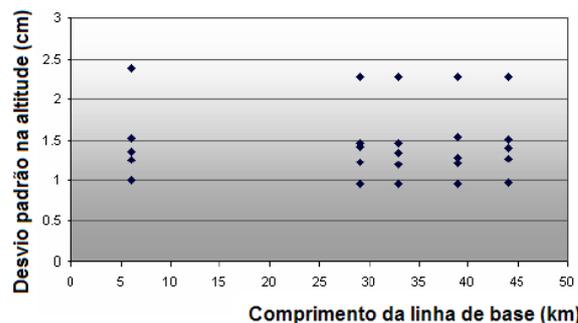


Fig. 10 – Desvio padrão na altitude com 24 horas de observação, analisando-se diferentes comprimentos de linha de base.

A detecção de deslocamento maior que o provocado também foi constatada nos deslocamentos de menor magnitude, da ordem de 2cm ou menor. Quanto aos deslocamentos provocados, maiores que 2cm, todos os resultados mostraram deslocamentos detectados inferiores e, conseqüentemente, correspondência na direção do deslocamento ocorrido, sendo que a diferença máxima entre o deslocamento real e o detectado foi da ordem de 1cm.

Tabela 2 – Análise dos deslocamentos detectados com 24 horas de observação para diferentes comprimentos de linha de base.

Comprimento da linha de base	Correspondência na direção do deslocamento
6 km	Sim
29 km	Sim
36 km	Não para os deslocamentos abaixo de 2 cm
39 km	Não para os deslocamentos igual a de 0.5 cm
44 km	Não para os deslocamentos abaixo de 2 cm

* em valores absolutos.

De acordo com Menge (2003), o erro advindo dos ruídos da eletrônica dos receptores GPS, interferências externas no sinal GPS, diferenças entre os canais de recepção dos sinais nos receptores GPS, e outros erros não modelados, e mesmo com o emprego de antenas iguais orientadas na mesma direção ou com os valores de variação do centro de fase (*phase center variations* – PCV) absolutos disponíveis, pode-se esperar um efeito do ruído nas medições, menor ou igual a 4 mm nos processamentos utilizando-se fase das portadoras em programas científicos. O ruído é, portanto, um agente limitador da capacidade de detecção dos deslocamentos verticais, devendo-se considerar, nesse contexto, como possível ocorrência de variação de altitude, apenas os valores superiores ao mesmo.

4. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados obtidos com a simulação de pequenos deslocamentos verticais pôde-se concluir que é possível a detecção de deslocamentos verticais da ordem de 5mm para linhas de base de até 30 km, quando as ambigüidades são fixadas. Com linhas de base mais longas (superiores a 30km) na simulação dos deslocamentos da ordem de 2cm ou menor foi constatada a ocorrência de deslocamento superior ao provocado.

Assim, podemos concluir que, em regiões costeiras, mesmo com pontos de referência em apenas um dos lados do ponto a determinar é possível obter valores de deslocamentos verticais com precisão, desde que se tenham pontos de referência com distâncias inferiores a 30km e que se façam medições prolongadas, com tempo de observação acima de 4hs.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao convênio CAPES/DAAD e ao CNPq/CT-Hidro pelas bolsas concedidas que permitiram a realização das atividades na Alemanha e no Brasil e ao *Institut für Erdmessung* da Universidade de Hannover onde foi realizado o experimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDIN, H.Z., DJAJA, R., DARMAWAN, D., HADI, S., AKBAR, A., RAJIYOWIRYONO, H., SUDIBYO, Y., MEILANO, I., KASUMA, M.A., KAHAR, J., SUBARYA, C., **Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System**, Natural Hazards 23, pp. 365-387, 2001

BITELLI, G., BONSIGNORE, F., UNGUENDOLI, M. **Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley**, Journal of Geodynamics, 30: 355-369, 2000.

CABRAL, J.J.S.P., SANTOS, S.M., DEMÉTRIO, J.G.A., MONTENEGRO, S.M.G.L. **A Groundwater Information System for Recife Metropolitan Region**, WIT Press, Management Information System 2000 – GIS and Remote Sensing, 1: 489-498, 2000

CHANG, C. **Estimation of Local Subsidence Using GPS and Levelling Combined Data**, Surveying and Land Information Systems, Vol. 60, N. 2, p. 85-94, 2000

GEOPP. **GEONAP - Referenz Handbuch**. GEOSPACE-Gesellschaft für Satellitengestützte Geodätische und Navigatorische Technologien mbH, Alemanha, 2000.

MENGE, F. **Zu Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung**, Tese de doutorado N°. 247, Universität Hannover, Alemanha, 2003.

MOUSAVI, S.M.; SHAMSAI, A.; EL NAGGAR, M.H.; KHAMEHCHIAN, M. **A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran**. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, p. 452-464, 2001.

OGAJA, C. **Advances in structural monitoring with Global Positioning System technology: 1997–2006**. Journal of Applied Geodesy 1(3), 2007.

SANTOS, S.M. **Investigações Metodológicas sobre o Monitoramento da Subsidência do Solo devido à Extração de Água Subterrânea – Caso da Região Metropolitana de Recife**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

SANTOS, S.M.; ROMÃO, V.M.C. GPS zur Bestimmung von Bodensenkungen in Recife. **Wissenschaftliche Arbeiten Der Fachrichtung Vermessungswesen Der Universität Hannover**, ISSN 0174-1454, Hannover, v. Nr.258, p. 133-139, 2006.

SATO, H.P., ABE, K., OORAKI, O. **GPS-Measured Land Subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan**, Enginering Geology: 67, p. 379-390, 2003.

SCHAAL, R.E. **Measuring Dynamic Oscillations of a Small Span Cable-Stayed Footbridge: Case Study Using L1 GPS Receivers.** Journal of Surveying Engineering 135(1), 2009.

SCHAAL, R.E, LAROCCA, A.P.C. **A Methodology for Monitoring Vertical Dynamic Sub-Centimeter Displacements with GPS.** GPS Solutions, Springer Berlin / Heidelberg, Volume 5, Number 3 / January, 2002

SEEBER, G. **Satellite Geodesy.** Foundations, Methods, and Applications. De Gruyter, Berlin, 2003.

SNEED, M., STORK, S.V., IKEHARA, M.E., **Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1998-2000,** U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 02-4239, 29p, 2002

SNEED, M., IKEHARA, M.E., STORK, S.V., AMELUNG, F., GALLOWAY, D.L., **Detection and Measurement of Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System, San Bernardino County, Mojave Desert, California,** U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 03-4015, 69p., 2003

WÜBBENA, G. **The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models.** Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, p. 452-461, 1989.