

RESULTADOS PRELIMINARES DA ESTIMATIVA DE SUBSIDÊNCIA ATRAVÉS DO MONITORAMENTO COM USO DO GNSS

Rejane Luna¹ & Sylvana Santos² & Jaime Cabral³ & J Silvio Garnés⁴ & Haroldo Marques⁵

RESUMO – O uso de águas subterrâneas vem aumentando constantemente, nas últimas décadas, no Brasil e em outras localidades em todo o mundo. A subsidência do solo, muitas vezes, tem uma forte ligação com o processo de desenvolvimento urbano, por causa do aumento de áreas edificadas, crescimento da população, de atividades econômicas e industriais, e da extração de águas subterrâneas. Métodos geodésicos, para quantificar a deformação vertical do solo, devido à retirada de águas subterrâneas, têm sido utilizados em registros do fenômeno em todo o mundo, dentre os quais o do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em pontos distribuídos dentro e fora da área em que se investigam os movimentos do solo, compondo, assim, uma rede de monitoramento de subsidência. Através da comparação das alturas desses pontos, realizados em diferentes épocas, pode-se ter um indício da quantificação do fenômeno. Esse trabalho apresenta uma análise com o propósito de validar a utilização de métodos geodésicos, em particular o GNSS na medição de pequenos deslocamentos verticais do solo, em áreas urbanas, utilizando como campo de testes, uma área do *campus* da UFPE e outra na praia de Boa Viagem, em Recife, aplicando a sugestão do experimento realizado na Universidade de Hannover por Santos (2005).

Palavras-Chave – subsidência do solo, superexploração de água subterrânea, posicionamento preciso.

PRELIMINARY RESULTS OF ESTIMATING SUBSIDENCE BY GNSS MONITORING

ABSTRACT - The use of groundwater has been increasing steadily in recent decades, in Brazil and elsewhere around the world. The subsidence of the soil often has a strong link with the urban development process, because of the increase in built up areas, population growth, economic and industrial activities, and the extraction of groundwater. Geodetic methods to quantify the vertical deformation of the soil due to the removal of groundwater have been used in the phenomenon records worldwide, among which the GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) at points distributed inside and outside the investigating area where earth movements, thereby making up a network monitoring subsidence. By comparing the heights of these points, made at different times, you can have a clue of quantifying the phenomenon. This paper presents an analysis in order to validate the use of geodetic methods, in particular GNSS measurement of small vertical displacements of the soil in urban areas, using as testing ground, an area of the UFPE campus and

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Centro de Tecnologia e Geociências – CTG, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901 – Recife, PE, Brasil. E-mail: rejane_luna@yahoo.com.br

² Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM, Centro Acadêmico do Agreste – CAA, UFPE. E-mail: sylvana.ufpe@gmail.com

³ Professor do PPGEC/CTG/UFPE. E-mail: jcabral@ufpe.br

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – PPGCGTG, CTG/UFPE. E-mail: sjgarnes@gmail.com

⁵ Professor do PPGCGTG/CTG/UFPE. E-mail: haroldoh2o@gmail.com

another on the beach Boa Viagem, Recife, applying the suggestion of the experiment conducted at the University of Hannover by Santos (2005).

Keywords – soil subsidence, groundwater overexploitation, precise positioning.

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas que compromete a sustentabilidade do uso de água subterrânea é o risco de subsidência do solo, que precisa ser analisado com cuidado para prevenir ou mitigar prejuízos em edificações e pavimentos. Uma das causas de subsidência do solo é a retirada de fluido de vazios subterrâneos (poros ou cavidades). Nos grandes centros urbanos e em áreas destinadas à agricultura e às atividades industriais, a exploração demasiada de água subterrânea, que resulta num ritmo de extração superior à capacidade de recarga, constitui a causa mais comum de subsidência, como pode ser observado na grande quantidade de registros do fenômeno em todo o mundo (Galloway et al. 2008; Carreón-Freyre et al. 2010; Galloway and Burbey 2011). A discussão sobre os mecanismos de ocorrência indica a necessidade de maior investigação sobre o tema, para o desenvolvimento de ferramentas de previsão e simulação de cenários, de estratégias de monitoramento e de técnicas de mitigação do problema. Neste contexto, métodos geodésicos, para quantificar a deformação vertical do solo, devido à retirada de águas subterrâneas, têm sido utilizados em registros do fenômeno avaliado em todo o mundo, dentre os quais se destaca o uso do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em pontos distribuídos dentro e fora da área em que se investiga os movimentos do solo, compondo, assim, uma rede de monitoramento de subsidência. Através da comparação das alturas desses pontos, realizados em diferentes épocas, pode-se ter um indício de estimativa para quantificar o fenômeno.

Segundo Santos, Cabral & Pontes Filho (2012), em geral, o fator que afeta a acurácia obtida para as coordenadas utilizando o GNSS é a qualidade da geometria da constelação de satélites e a localização da antena do receptor no ponto escolhido em relação a superfícies refletoras. A melhor geometria na constelação de satélites é identificada por uma quantidade chamada PDOP (*Positional Dilution of Precision*), de modo que os menores valores de PDOP estão associados às melhores configurações geométricas e conseqüentemente às melhores precisões na determinação da posição. A geometria dos satélites tem um maior impacto quando o receptor GNSS é usado em áreas urbanas (próximo a edifícios), em vales e regiões montanhosas, já que a presença de obstrução pode provocar multicaminhos nos sinais enviados pelos satélites, diminuindo a acurácia do posicionamento. Hoje em dia, devido à quantidade favorável de satélites, o valor do PDOP fica, em geral, abaixo de cinco. No entanto, nos casos de muitas obstruções, é necessário checar os valores de PDOP e fazer uma análise crítica dos resultados obtidos.

Entre as três coordenadas determinadas a partir do GNSS, a altitude geométrica (ou elipsoidal) se destaca devido à sua maior sensibilidade à influência de erros na sua determinação. Dentre as fontes de erro que mais interferem na determinação da altitude geométrica, causando assim um condicionante para obtenção de sua precisão, estão: a configuração geométrica dos satélites, as refrações da ionosfera e da troposfera, o valor calibrado do centro de fase e sua variação com o azimute e altura dos satélites. De acordo com Santos (2005), a minimização desses erros depende de algumas circunstâncias operacionais decisivas para o posicionamento GNSS, tais como: o comprimento da linha de base, a duração da sessão, a disponibilidade de equipamentos de dupla

frequência, a quantidade de receptores GNSS, a quantidade de satélites rastreados e a rigidez geométrica da constelação de satélites.

No estudo da técnica GNSS para detecção de pequenos deslocamentos verticais, como os que ocorrem no início do fenômeno da subsidência, Santos (2005) realizou um experimento para simular um deslocamento vertical semelhante ao observado com a ocorrência de subsidência do solo. De acordo com Santos (2005), observações GNSS foram utilizadas na análise da influência que os edifícios podem ter nos arredores das estações GNSS, situação comum nos centros urbanos. Para este fim, foram realizados processos de simulação da existência de obstáculos. O experimento descrito por Santos (2005) foi realizado no telhado da Universidade de Hannover, na Alemanha, entre os dias 10 e 21 de setembro de 2004. Segundo a autora, foi feito um levantamento estático utilizando dois receptores GNSS, com sessões de no mínimo 48 horas e sete pontos pertencentes à rede de monitoramento contínuo da Alemanha (SAPOS). Em um dos receptores, a antena sofreu variações de altura, ao longo do rastreamento, simulando uma subsidência, tendo sido possível, ao final do experimento, detectar os deslocamentos introduzidos na antena, provando que a tecnologia pode ser aplicada para detecção de pequenos deslocamentos verticais (Santos, 2005).

Este trabalho tem por objetivo validar a utilização de métodos geodésicos, em particular o GNSS na medição de pequenos deslocamentos verticais do solo, em áreas urbanas, utilizando como campo de testes, uma área do *campus* da UFPE e outra na praia de Boa Viagem, em Recife, aplicando a sugestão do experimento realizado na Universidade de Hannover por Santos (2005).

2 RISCOS DE SUBSIDÊNCIA

De acordo com Cabral, Santos & Pontes Filho (2006), a subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo. Os autores discutiram as principais características do mecanismo causador da subsidência e destacaram a subdivisão do mesmo, apresentada por Mingnorange (2000) em cinco grupos: hidrocompactação, dissolução de rochas e sais, extração de água subterrânea, extração de petróleo ou gás e atividade mineira. A subsidência associada à extração de águas subterrâneas em aquíferos sedimentares constitui o grupo estudado no presente trabalho e, segundo Cabral, Santos & Pontes Filho (2006), essa subsidência é resultante do bombeamento do fluido que reduz a pressão dos poros que ajudam a suportar as camadas subjacentes do solo, como consequência do rebaixamento do nível da água. Os autores afirmam ainda que, considerando as demandas existentes e a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário realizar a gestão adequada desses recursos para que a captação da água do aquífero seja realizada de forma compatível com a capacidade de recuperação do mesmo. Caso contrário, é preciso avaliar os riscos geotécnicos resultantes da exploração dessa área. De acordo com os autores, a exploração da água subterrânea pode ser considerada demasiada quando provoca danos ao meio ambiente ou para o próprio recurso, como aumento nos custos de bombeamento, escassez de água, inundação de água contaminada e problemas geotécnicos de subsidência.

Galloway & Burbey (2011) afirmam que, a subsidência é um fenômeno sutil que pode ser observado pelo movimento do solo através de deformações e falhas. As deformações provocadas por deslocamentos verticais e horizontais são os principais riscos associados à retirada de águas

subterrâneas. Sendo assim, o controle geodésico, além de modelos matemáticos (simulações numéricas), são importantes para avaliar esses riscos e estabelecer previsões futuras. Ainda de acordo com os mesmos autores, para o estudo da subsidência geralmente são implantados *bench marks* através de nivelamentos de primeira ou segunda ordem. De acordo com Tusat, Ustun & Yalvac (2010), a subsidência é um dos riscos, em potencial, que possam surgir como resultado de serem retiradas quantidades excessivas de água subterrânea.

3 EFEITO PROVOCADO PELO MULTICAMINHO DO SINAL GNSS

3.1 Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis GNSS

De acordo com Monico (2008) as observáveis GNSS, como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático (funcional e estocástico) estabelecido deve ser válido para a realidade física que se tenta descrever e capaz de detectar problemas. Dessa forma, as fontes de erro envolvidas nos processos de medidas devem ser bem conhecidas. O autor alerta que erros sistemáticos podem ser parametrizados, modelados como termos adicionais, reduzidos ou mesmo eliminados por técnicas apropriadas de observação, enquanto que os erros aleatórios, por sua vez, não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e são, em geral, as discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros grosseiros e sistemáticos foram eliminados ou minimizados, os quais são inevitáveis, sendo, portanto, considerados uma propriedade inerente da observação. O autor destaca como possíveis fontes de erro nas observáveis GNSS: os satélites, a propagação do sinal, o receptor/antena e a própria estação.

3.2 Erro de multicaminho relacionado à propagação do sinal

Para Monico (2008) o efeito provocado pelo multicaminho do sinal é bem descrito pelo próprio nome. O receptor pode, em algumas circunstâncias, receber, além do sinal que chega diretamente à antena, sinais refletidos em superfícies vizinhas a ela, como construções, carros, árvores, massa d'água, cercas, etc. O multicaminho é ilustrado na Figura 1. Nota-se que o sinal chega ao receptor por dois caminhos diferentes, um direto e um indireto.

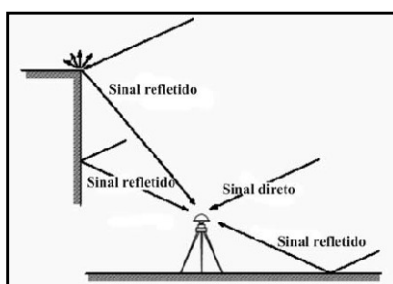


Figura 1 – Ilustração da ocorrência de multicaminho
Fonte: Monico, 2008

Monico (2008) destaca que, dessa forma, os sinais recebidos no receptor podem apresentar distorções na fase da onda portadora e na modulação sobre ela. O autor explica que, em geral não há um modelo para tratar o efeito do multicaminho, pois as situações geométricas de cada local variam

de forma um tanto arbitrária e, portanto, em muitas situações, as observáveis fase da onda portadora e pseudodistância são degradadas em razão do multicaminho, o que afeta a qualidade do posicionamento.

A ocorrência do multicaminho depende da refratividade do meio onde se posiciona a antena, das características da antena e das técnicas empregadas nos receptores para produzir os sinais refletidos. As condições um tanto arbitrárias da geometria e do ambiente envolvendo o levantamento tornam a modelagem desses efeitos muito difícil, embora algumas combinações de observáveis permitam avaliar o nível de sinais refletidos (Monico, 2008).

4 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

4.1 Simulação no campus da UFPE

Como rede de referência para o processamento dos dados GNSS, foram utilizados quatro pontos localizados no *campus* da UFPE: RBMC (no terraço da biblioteca central do *campus*), os pontos localizados no terraço do Laboratório de Astronomia do CTG (LAASTRO-C e LAASTRO-E) e um ponto da rede geodésica do campus da UFPE (EPS-04), conforme esquema apresentado na Figura 2.

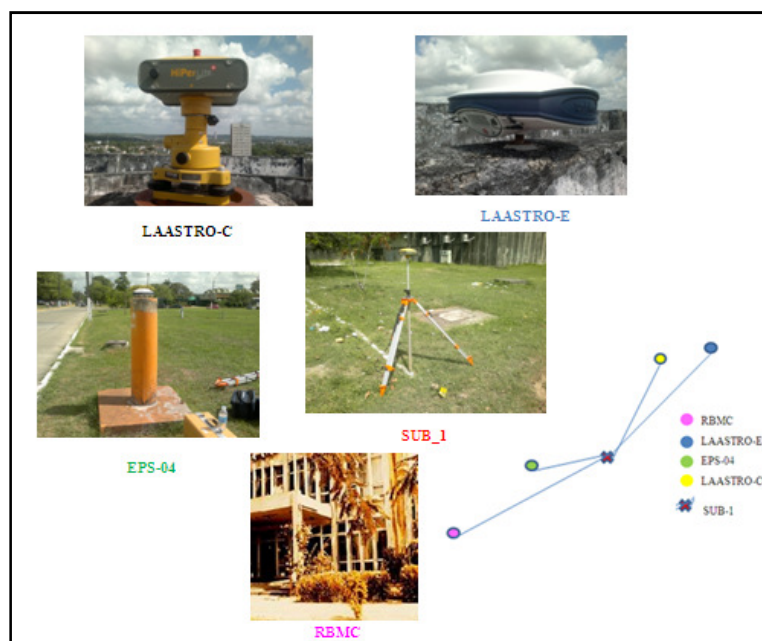


Figura 2 – Esquema com a configuração geométrica da rede utilizada - *campus* UFPE

Para simulação do fenômeno da subsidência foi utilizado o ponto localizado entre os quatro pontos da rede de referência, denominado SUB-1, cuja configuração geométrica para o experimento está explicitada na Figura 2. O rastreamento foi realizado no dia 22 de janeiro de 2013, no campus da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) em Recife. Foram utilizados 02 (dois) pares de rastreadores GNSS, da Topcon e Ashtech, ambos com dupla frequência (L1 e L2), sendo que o primeiro rastreou as constelações de satélites GPS e GLONASS. O método de rastreamento aplicado foi estático com duração de aproximadamente 5 horas. Para o ponto SUB-1, no qual se simulou a

subsidiência, o tempo de rastreamento foi de 2 horas para cada uma das posições. O experimento consistiu em serem instalados inicialmente os receptores nas estações de referência LAASTRO-C, LAASTRO-E e EPS-04, além da RBMC (RECF), conforme Quadro 1, com as informações de início e término do rastreamento, tipo de receptor e altura da antena. Em seguida, instalou-se o receptor no ponto SUB-1, fixado a um bastão de altura regulável. Inicialmente a altura do bastão foi regulada em 1,50m, conforme mostra a Figura 3. O receptor permaneceu nessa posição por 2 horas. Ao término desta sessão, o receptor foi desligado, a altura foi alterada para 1,49m e iniciou-se uma nova sessão, também com duração de 2 horas. Para esta segunda posição do bastão o ponto foi chamado de SUB1_2, conforme mostram o Quadro 2 e a Figura 3.

Quadro 1- Informações das estações de referência.

Estação	Alt. Antena (cm)	Início	Término	Receptor
LAASTRO-C	13,65	8 h 46 min	13 h 15 min	Hiper (base)
LAASTRO-E	0,00	8 h 50 min	13 h 15 min	Ashtech
EPS-04	0,00	9 h 02 min	13 h 15 min	Ashtech
RECF	0,071	8 h 46 min	13 h 15 min	Trimble

Quadro 2 - Informações do ponto de simulação da subsidiência.

Estação	Alt. Antena (cm)	Início	Término	Receptor
SUB-1	1,50	9 h 13 min	11 h 13 min	Hiper (rover)
SUB1_2	1,49	11 h 15min	13 h 15 min	Hiper (rover)

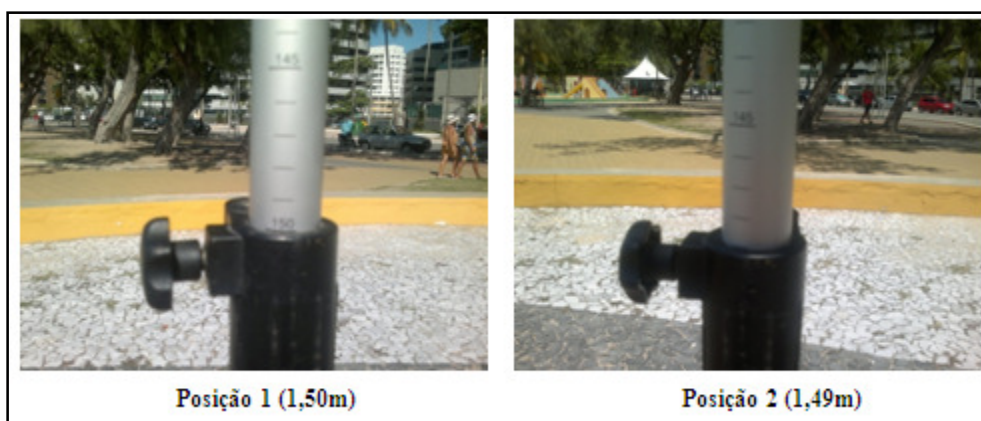


Figura 3 – Posições do bastão na simulação da subsidiência.

Para o processamento dos dados de rastreamento utilizou-se o software Topcon Tools. Sendo que os dados rastreados com os receptores Ashtech foram convertidos para o formato RINEX, para que pudessem ser processados com o mesmo programa. Utilizou-se como ponto de referência fixa apenas a RBMC (RECF – estação de Recife pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), os demais pontos serviram para oferecer estabilidade à configuração geométrica do experimento. As informações relativas ao ponto de controle da RBMC em SIRGAS 2000, bem como os resultados após o processamento dos dados, estão explicitadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados do processamento

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTURA ELIPSOIDAL (m)
LAASTRO_C	08° 03' 10,89721" S	34° 57' 16,95435" W	49,213
SUB1_1	08° 03' 05,87946" S	34° 57' 12,24261" W	3,434
SUB1_2	08° 03' 05,87952" S	34° 57' 12,24271" W	3,442
RECF	08° 03' 03,46970" S	34° 57' 05,45910" W	20,180
EPS04	08° 03' 05,84152" S	34° 57' 11,62481" W	4,912

Comparando-se as alturas elipsoidais para os pontos Sub1_1 (SUB-1) e Sub1_2 (SUB1_2), constata-se que a metodologia conseguiu detectar o deslocamento de 1cm (um centímetro), simulado para o ponto do experimento. Essa verificação foi feita considerando-se um baixo índice de obstrução para a área de estudo com valores de PDOP aceitáveis, abaixo de 2.

4.2 Simulação em Boa Viagem

Como rede de referência para o processamento dos dados GNSS, foram utilizados quatro pontos, sendo três localizados no *campus* da UFPE: RBMC (no terraço da biblioteca central do *campus*), os pontos localizados no terraço do Laboratório de Astronomia do CTG (LAASTRO-C e LAASTRO-E) e um ponto da rede geodésica do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro), o marco V-12 da Engefoto, próximo ao busto do Almirante Alfredo Carlos Dutra, em frente aos n^{os} 1998 e 1958, na avenida Boa Viagem, conforme esquema apresentado na Figura 4.

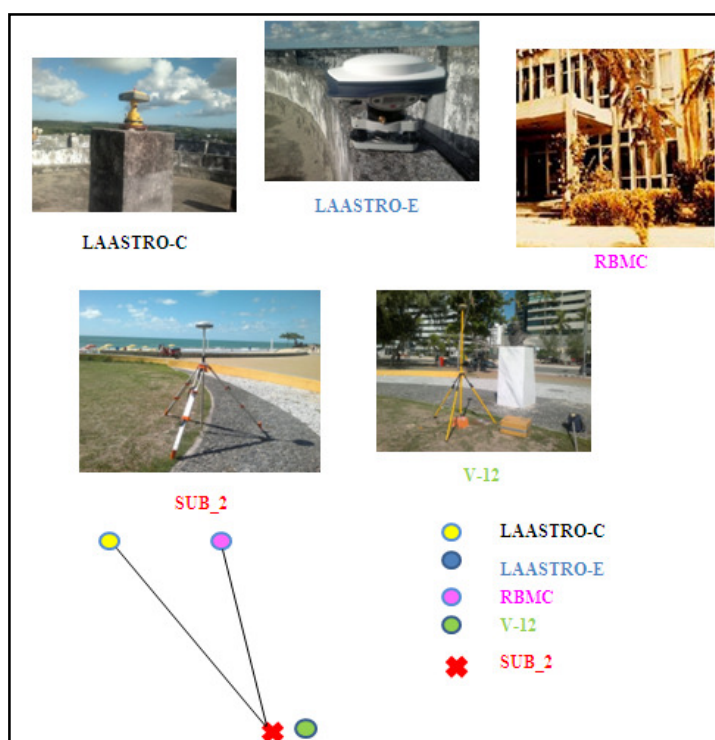


Figura 4 – Esquema com a configuração geométrica da rede utilizada – Praia de Boa Viagem

Para simulação do fenômeno da sbsidência foi utilizado o ponto Sub_2 localizado acerca de 7,00m do ponto V-12, cuja configuração geométrica para o experimento está explicitada na Figura

4. O rastreo foi realizado no dia 30 de março de 2013, na Praia de Boa Viagem em Recife. Foram utilizados 02 (dois) pares de rastreadores GNSS, da Topcon e Ashtech, ambos com dupla frequência (L1 e L2), sendo que o primeiro rastreou as constelações de satélites GPS e GLONASS. O método de rastreo aplicado foi estático com duração de aproximadamente 5 horas. Para o ponto SUB-2, no qual se simulou a subsidência, o tempo de rastreo foi de 2 horas para cada uma das posições. O experimento consistiu em serem instalados inicialmente os receptores nas estações de referência LAASTRO-C e LAASTRO-E, além da RBMC (RECF). Em seguida, a equipe deslocou-se aproximadamente 9,5Km até a praia e instalou o receptor no ponto SUB-2, fixado a um bastão de altura regulável. Inicialmente a altura do bastão foi regulada em 1,50m, conforme mostra a Figura 3, para esta posição o ponto foi chamado de SUB2_1. O receptor permaneceu nessa posição por 2 horas. Ao término desta sessão, o receptor foi desligado, a altura foi alterada para 1,49m e iniciou-se uma nova sessão, também com duração de 2 horas. Para esta segunda posição do bastão o ponto foi chamado de SUB2_2. O Quadro 4 apresenta as informações de início e término do rastreo, tipo de receptor e altura da antena.

Quadro 4 - Informações das estações de referência e do ponto de simulação da subsidência.

Estação	Alt. Antena (cm)	Início	Término	Receptor
LAASTRO-E	9,25	7 h 32 min	13 h 30 min	Ashtech
LAASTRO-C	16,55	7 h 36 min	13 h 30 min	Hiper (base)
V12	2,00	8 h 23 min	12 h 47 min	Hiper
SUB2_1	1,50	8 h 40 min	10 h 40 min	Ashtech
SUB2_2	1,49	10 h 42 min	12 h 42 min	Ashtech

Após o processamento dos dados de rastreo foram obtidos os resultados explicitados no Quadro 5.

Quadro 5 - Resultados do processamento

Ponto	Latitude	Longitude	Altura Elipsoidal (m)
LAASTRO-C	8°03'10,89163"S	34°57'16,9558"W	49,155
V-12	8°06'30,15868"S	34°53'17,3268"W	1,4612
SUB2_1	8°06'30,39827"S	34°53'17,3875"W	1,6064
SUB2_2	8°06'30,39782"S	34°53'17,3881"W	1,5451
RBMC	8°03'03,46420"S	34°57'05,4607"W	20,1327

Comparando-se as alturas elipsoidais para os pontos Sub2_1 e Sub2_2, constata-se que a metodologia não conseguiu detectar o deslocamento de 1cm (um centímetro), simulado para o ponto do experimento, indicando uma discrepância de 6cm. Essa verificação foi feita considerando-se os valores apresentados no Quadro 5. Possivelmente, as observáveis foram degradadas afetando a qualidade do posicionamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem poucos registros ou relatos de subsidência devido à captação de águas subterrâneas no Brasil. Na planície de Recife, até a presente data, ainda não foi detectado nenhum registro, o que não significa que o fenômeno não esteja acontecendo.

Considerando-se os estudos realizados com respeito à diminuição dos níveis de água subterrânea na planície de Recife, faz-se necessário um monitoramento, nessas áreas, para detecção de possíveis deslocamentos verticais da superfície do solo, através de levantamentos geodésicos como o GNSS, aliado a outras metodologias para fins comparativos de investigação. No entanto, não é tão fácil o uso da tecnologia GNSS para detecção do fenômeno da subsidência, principalmente quando a velocidade de deslocamento do solo é da mesma ordem de grandeza que a precisão obtida com o equipamento.

Além disso, deve-se observar que, com o aumento do comprimento da linha de base, aumentam também os cuidados necessários para se ter acurácia na altimetria, uma vez que pode ocorrer degradação nas observáveis, afetando a qualidade do posicionamento. No experimento de simulação de subsidência, realizado na orla da praia de Boa Viagem, em Recife, verificou-se que não foi possível detectar o valor de 1cm simulado para o fenômeno, utilizando-se a mesma metodologia descrita neste artigo aplicada no *campus* da UFPE. Para tal experimento a rede de referência utilizada para o processamento dos dados GNSS, composta por três estações, encontrava-se a uma distância de 9500m, aproximadamente, do ponto de simulação na orla de Boa Viagem, enquanto que no experimento realizado no *campus* da UFPE, as linhas de base mediram pouco mais que 210m.

Além do aumento da linha de base, outro fator que pode ter afetado os resultados dessa simulação seria o fato de ao longo dessa linha de base existir obstruções para os sinais GNSS devido à grande quantidade de edifícios, por ser esta uma área predominantemente urbanizada. A geometria dos satélites tem um maior impacto quando o receptor GNSS é usado em áreas dessa natureza, já que a presença de obstrução pode provocar multicaminhos nos sinais enviados pelos satélites, diminuindo a acurácia do posicionamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos – Ministério da Ciência e Tecnologia) e ao CNPq e a CAPES pelos recursos financeiros disponibilizados permitindo a realização das atividades de campo, ao LAGEO (Laboratório de Astronomia e Geodésia do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE) pelos equipamentos e recursos humanos disponibilizados para a realização das atividades de campo desse experimento e ao IFPE (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – campus Recife, pela liberação da primeira autora para desenvolvimento das pesquisas.

REFERÊNCIAS

BALDI, P. et al. *GPS – Based monitoring of land subsidence in the Po plain (Northern Italy)*. **Earth and Planetary Science Letters** – Elsevier p.204-212. 2009.

CABRAL, J.J.S.P.; SANTOS, S. M., PONTES FILHO, I.D.S. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, 147-157, 2006.

COSTA, W. D. et al. Zoneamento de exploração das águas subterrâneas na cidade do Recife-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10.; 1998, São Paulo. **Anais do X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo, 1998.

GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T.J. *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*. **Hydrogeology Journal** 19:[s.n.] 1459–1486. 2011.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. UFPR Curitiba-PR:[s.n.], 2 ed. 1999.

IBGE. **Banco de dados geodésicos**. Disponível em:

< http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/bdgpesq_googlemaps.php#tabela_dados>.

Acesso em março 2013.

LUZ, T. R. **Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao Sirgas**. 2008. Tese - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2008.

MINGORANCE, F. *Manifestaciones de subsidência superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina*. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, Argentina 41, p.5-16. 2000.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. UNESP São Paulo-SP: 2ed. 2008.

SANTOS, S. M. **Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea - caso da Região Metropolitana de Recife**. 2005.231 p. Tese – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SANTOS, S. M. , CABRAL, J. J. S. P. ; PONTES FILHO, I. D. S. *Monitoring of soil subsidence in urban and coastal areas due to groundwater overexploitation using GPS*. **Natural Hazards – Dordrecht, Online**, v. 64, p. 421-439, 2012.

SCOTT, R.F. *Subsidence – A Review. Evaluation and Prediction of Subsidence*. **ASCE**, New York, p.1-25. 1979.

SILVA, S. R.; MONTEIRO, A. B.; FRANÇA, A. E. O gerenciamento das águas subterrâneas no Estado de Pernambuco In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS,13.; 1999. Belo Horizonte. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 1999.

TUSAT, E.; USTUN, A.; YALVAC, S. *Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006-2009 by means of GNSS observations*. **Natural Hazard**. [s.n.] p.10-1151.2010.