

Revista Brasileira de Cartografia (2016) N^o 68/1: 109-120
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS PRÓPRIOS DE CALIBRAÇÃO DE ANTENAS GPS NO PROCESSAMENTO EM REDES

Evaluation of Individual GPS Antenna Parameters in Networks Processing

**Renata Magda Cavalcante Werlich¹, Claudia Pereira Krueger¹,
Juan Carlos Báez Soto² & Günter Schmitt³**

**¹Universidade Federal do Paraná – UFPR
Departamento de Geomática**

Caixa Postal 19001 - Centro Politécnico, Jardim das Américas - 81531-990 Curitiba/PR, Brasil
renatawerlich@gmail.com; ckruieger@ufpr.br

**²Universidad de Chile – UCh
Centro Sismológico Nacional**

Blanco Encalada 2002 – Santiago, Chile
jcbaez@dgf.uchile.cl

**³Karlsruher Institut für Technologie – KIT
Geodätisches Institut**

Englestraße 7 – 76131 Karlsruhe, Deutschland
guenter.schmitt@kit.edu

*Recebido em 20 de Maio, 2015/ Aceito em 23 de Outubro, 2015
Received on May 20, 2015/ Accepted on October 23, 2015*

RESUMO

É comprovado que os erros sistemáticos inferem na definição das coordenadas geodésicas, degradando as mesmas. Desta forma estes erros requerem atenção especial. Portanto, além da análise da influência dos parâmetros próprios de antenas GPS no processamento em redes, foram observados os efeitos de multicaminho obtido em cada ponto. Os parâmetros individuais das antenas, neste trabalho, são advindos da BCAL/UFPR (Base de Calibração de Antenas GNSS na UFPR). Realizaram-se processamentos com os parâmetros do NGS (*National Geodetic Survey*), com o objetivo de efetuar as comparações. Nesta pesquisa foram realizadas três campanhas em três pontos com linhas de base de até 90 km entre eles e a BCAL/UFPR, empregando-se o posicionamento relativo estático. As redes formadas foram com 1 estação, 3 estações e 17 estações de coordenadas geodésicas precisas.

Palavras chaves: Antena GPS, Processamento em Rede, Alta Acurácia.

ABSTRACT

It is proven that the systematic errors influence the geodetic coordinates definition, degrading them. Thus these errors require special attention. Therefore, besides GPS antenna own parameters influence in processing networks analysis, multipath effects occurring at each station were also investigated. In this work, individual parameters of the antennas are obtained from the GNSS Antenna Calibration Base at UFPR (BCAL/UFPR). Data processing was performed with the NGS (*National Geodetic Survey*) parameters in order to make comparisons. In this study three campaigns were

carried out at three points, with baselines up to 90 km between them and the BCAL/UFPR, which were processed using the static relative positioning. The networks were formed with one station, 3 stations and 17 stations, all with known accurate geodetic coordinates.

Keywords: GPS Antenna, Network Processing, High Accuracy.

1. INTRODUÇÃO

Aplicações geodésicas que demandam acurácia necessitam de uma atenção especial aos erros sistemáticos atuantes. Tais aplicações podem ser em redes de monitoramento contínuo, e.g. RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), ou em monitoramento de estruturas civis.

A antena GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é uma fonte de erros sistemáticos. O presente trabalho, além do processamento em redes, enfoca em dois principais erros sistemáticos: o efeito de multicaminho e o erro de centro de fase da antena.

O efeito de multicaminho caracteriza-se pela chegada de um ou mais sinais à antena do receptor além do sinal direto advindo do satélite devido às reflexões em superfícies refletoras próximas da antena e durante o percurso do sinal do satélite ao receptor (BARBIERI, 2004).

De acordo com Leick (1995), os sinais dos satélites com baixa elevação são, geralmente, os mais afetados pelo efeito do multicaminho. Isto ocorre por estes sinais estarem mais sujeitos à reflexão em face de estarem incidindo na antena com um ângulo de inclinação muito próximo ao horizonte. O efeito de multicaminho ocasiona erro nas medidas de código, da fase da onda portadora e razão sinal-ruído (BARBIERI, 2004).

A influência do multicaminho nas medidas da fase da onda portadora acarreta em uma limitação para se alcançar alta precisão nos posicionamentos geodésicos (RAY *et al.*, 1998). O atraso na fase da onda portadora devido ao multicaminho acarreta erros de no máximo $\frac{1}{4}$ de ciclo de onda (SOUZA, 2004).

Os *offsets* da antena, valores que conectam as medidas GNSS ao ponto de interesse, são afetados pela variação do centro eletrônico. O *offset* do centro de fase da antena é dividido em dois elementos o PCO (*Phase Center Offset*) e o PCV (*Phase Center Variations*). O PCO, *offset* do centro de fase médio (CF), é o vetor \vec{P} entre o centro de fase médio e o ARP (*Antenna Reference Point*), com componentes Norte (N), Este (E) e altitude elipsoidal (h). O segundo,

denominado PCV, é um deslocamento adicional do centro de fase. Ele é, obtido em função da elevação ou da elevação e azimute de incidência do sinal advindo do satélite GNSS (Figura 1).

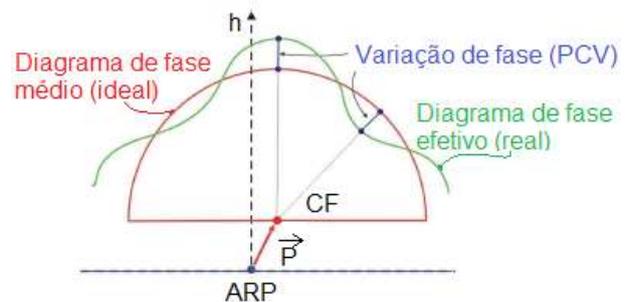


Fig. 1 - Interpretação do PCV em função do PCO. Fonte: Adaptado de Freiburger Junior (2007).

antena tem suas características individuais, conseqüentemente, as variações são singulares e desta forma, devem ser tratadas de forma particular. Se elas forem calibradas de forma individual irão conduzir a valores próprios de PCO e PCV. Segundo Mader (1999; 2001), ignorar os valores das variações do centro de fase da antena, na determinação de coordenadas geodésicas precisas de um ponto, pode conduzir a erros na coordenada vertical de até 10 cm. Nas coordenadas horizontais podem-se introduzir erros de até 3 cm (SEEBER, 2000).

A diferença entre o uso de valores médios fornecidos pelo NGS (*National Geographic Service*) e os de calibração individual, da BCAL/UFPR (Base de Calibração de Antenas GNSS na UFPR), para a antena Trimble TRM22020.00+GP, na componente da altitude elipsoidal, segundo Huinca (2009), chegou à 1,84 cm em processamento de linha de base longa (430 km).

A altitude elipsoidal é a componente mais afetada pelas variações do centro de fase. Linhas de base médias e longas sofrem mais com os erros de centro de fase. A diferença em altitude elipsoidal encontrada entre o emprego dos parâmetros do NGS e da BCAL/UFPR, em uma linha de base longa (98 km), com a antena Leica LEIATX1230, foi de 1,16 cm (WERLICH, 2012).

No presente trabalho foram aplicados

no processamento de dados advindos de levantamentos realizados com o GPS (*Global Positioning System*) os parâmetros das antenas, calibradas individualmente na BCAL/UFPR. A fim de corroborar os resultados já alcançados em Werlich (2012) novos levantamentos foram efetuados com um tempo de ocupação mínimo de 19 horas, com repetitividade e simultaneidade, visando à formação de redes.

Foram realizadas três campanhas em três pontos em um raio de até 90 km a partir da BCAL/UFPR. As redes formadas foram com 1 estação, 3 estações e 17 estações de coordenadas geodésicas precisas.

2. ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo engloba a BCAL/UFPR (FREIBERGER JUNIOR, 2007; HUINCA, 2009; HUINCA E KRUEGER, 2011; HUINCA ET AL., 2012; WERLICH, 2012), localizada no Campus Jardim das Américas do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 3 pontos distantes em até 90 km da BCAL/UFPR, além das estações IGS (*International GNSS Service*) e da RBMC. Esta área de estudo, pode ser vista na Figura 2.

O grupo de linhas de base, de até 90 km de distância a partir da BCAL/UFPR, círculo amarelo da Figura 2, abrange as estações localizadas nas cidades de Curitiba (BCAL/UFPR), Palmeira (PALM, Figura 3), Campo Alegre (CAMP, Figura 4), pertencente ao estado de Santa Catarina, e Pontal do Paraná (CEM, Figura 5).

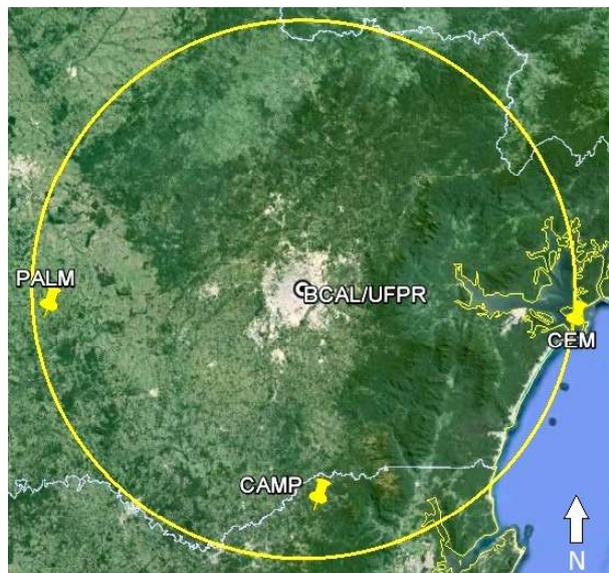


Fig. 2 - Área de estudo.
Fonte: Adaptado de Google Earth (2014).



Fig. 3 - Ponto PALM



Fig. 4 - Ponto CAMP.



Fig. 5 - Ponto CEM

3. EQUIPAMENTOS E PROGRAMAS

Para a obtenção de observações GPS para a realização dos experimentos foram utilizados receptores geodésicos de dupla frequência Leica GRX1200 e as antenas indicadas na Tabela 1 e apresentadas na Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

Tabela 1: Equipamentos utilizados em cada ponto

Ponto	Antena
PALM	LEIATX1230
CAMP	LEIAX1203+GNSS
CEM	LEIAX1202GG



Fig. 6 - LEIATX1230. Fonte: NGS (2014)



Fig. 7 - LEIAX1203+GNSS. Fonte: NGS (2014)



Fig. 8 - LEIAX1202GG. Fonte: NGS (2014)

A detecção, localização e quantificação do efeito de multicaminho na fase da onda portadora foi efetuada com o programa *Wasoft/Multipath* versão 3.44 (WANNINGER E MAY, 2000). O mesmo foi desenvolvido pelo *Geodetic Institute, Dresden University of Technology*, Alemanha. Para a execução do programa são necessários dados GPS de três a seis estações. As observações de dupla frequência e dados de navegação devem ser de 24 horas contínuas e simultâneas entre as estações da rede. O *Wasoft/Multipath* é um dos diversos módulos pertencentes ao programa *Wasoft*.

Desenvolvido pelo *Astronomical Institute of the University of Bern (AIUB)*, Suíça, o programa *Bernese GNSS* está na versão 5.2 (DACH ET AL, 2007), disponível desde 2012. Este programa foi empregado no processamento e para a obtenção de informações para a análise de dados GNSS. Tal programa é composto por um conjunto de programas científicos que proporcionam as maiores exigências de acurácia em escalas regionais a redes globais.

4. LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Optou-se por coletar somente observações GPS com o Método de Posicionamento Relativo Estático, com os equipamentos descritos na seção 3. O intervalo de gravação dos dados foi igual a 15 segundos com máscara de elevação de 0°, visando a análise do efeito de multicaminho.

Nos pontos selecionados, foram realizadas as observações GPS, conforme se pode verificar na Tabela 2.

Os rastreios apresentam duração total de aproximadamente 20 a 36 horas. Realizaram-se um total de 3 campanhas, com duração de 2 dias GPS cada uma das campanhas. Devido a duração dos rastreios, optou-se por empregar no processamento dos dados GPS, as observações coletadas nos dias GPS 21, 27 e 35.

Para a análise do efeito de multicaminho foram empregadas as observações com mais de 24 horas de coleta. Visando contribuir nas análises do efeito de multicaminho com o *software Wasoft/Multipath*, em cada um dos pontos, foi realizado, com o auxílio de um teodolito, o levantamento das obstruções existentes no seu entorno.

Tabela 2: Dia, horário e duração dos levantamentos de campo

Ponto	Dia GPS	Duração do levantamento	Duração total do levantamento
PALM	20	03h23min30s	24h13min45s
	21	20h50min15s	
	27	05h34min45s	27h02min30s
	28	21h27min45s	
	34	05h42min45s	27h10min45s
	35	21h28min00s	
CAMP	20	04h37min15s	25h33min00s
	21	20h55min45s	
	27	-----	19h57min00s
	28	19h57min00s	
	34	05h01min15s	26h33min45s
	35	21h32min30s	
CEM	20	05h30min45s	29h30min15s
	21	23h59min30s	
	27	11h57min00s	35h56min30s
	28	23h59min30s	
	34	07h13min15s	31h12min45s
	35	23h59min30s	

5. ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO

A escolha da estratégia de processamento adotada no presente trabalho foi dividida em três tópicos. O primeiro tópico trata das estações empregadas, posteriormente, os arquivos utilizados, assim como a construção do *Bernese Processing Engine* (BPE), descritos a seguir.

5.1 Estações utilizadas nas redes

Para o desenvolvimento dos experimentos foram incluídas 17 estações GNSS com coordenadas geodésicas precisas. Destas, 14 estações estão situadas no Brasil, 2 estações na Argentina e 1 estação no Chile. Na Figura 9 são apresentadas as estações selecionadas para os processamentos.

As observações destas estações foram obtidas de duas fontes, apresentadas a seguir:

As estações Arequipa (AREQ), Brasília (BRAZ), INPE Brazil (CHPI), La Plata (LPGS), UNSA Salta (UNSA) e Curitiba UFPR (UFPR) pertencentes a rede IGS (em verde na Figura 9).

As estações Araçatuba (SPAR), Araquari (SCAQ), Botucatu (SPBO), Campinas (SPCA), Cananéia (NEIA), Guarapuava (PRGU), Ilha Solteira (ILHA), Maringá (PRMA), Ourinhos

(OURI), Presidente Prudente (PPTE) e Rosana (ROSA) fazem parte da rede RBMC (em vermelho na Figura 9).

As redes foram denominadas de Rede G, Rede M e Rede P. Para a configuração da rede G, além dos pontos mencionados na seção 3, foram utilizadas todas as 17 estações. Na rede M apenas estações localizadas no Estado do Paraná (PRMA, PRGU e UFPR) são consideradas, assim como os pontos da seção 3. E a rede P contou apenas com as observações da estação UFPR, e os pontos da seção 3.



Fig. 9 - Estações utilizadas.

Fonte: Adaptado de Google Earth (2014).

5.2 Arquivos utilizados nos processamentos

Diversos arquivos são necessários para o processamento com o *software Bernese 5.2*. Alguns deles específicos para cada estação empregada no processamento, são apresentados a seguir.

5.2.1 Parâmetros de calibração de antena GPS

Além dos parâmetros de calibração de antena GPS do NGS utilizaram-se os valores próprios para as antenas utilizadas, advindos da BCAL/UFPR. Na Tabela 3 são apresentados os *offsets* advindos do NGS e da BCAL/UFPR. Salienta-se que somente para estas antenas realizaram-se as trocas dos parâmetros de calibração. Para todas as outras 17 estações (IGS e RBMC) foram utilizados somente valores do NGS, devido a impossibilidade de calibrar individualmente cada antena.

5.2.2 Arquivos de observação

Todos os dados diários das estações IGS e da RBMC foram obtidos em formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), a partir dos sites do IGS e do IBGE.

Tabela 3: Offsets advindos do NGS e BCAL/UFPR

L1			L2		
Norte (mm)	Leste (mm)	Up (mm)	Norte (mm)	Leste (mm)	Up (mm)
Antena: LEIAX1202GG Parâmetros BCAL/UFPR					
1,56	-0,54	62,12	-0,61	0,18	67,61
Antena: LEIAX1202GG Parâmetros NGS					
1,64	-0,52	63,42	-1,20	0,23	62,13
Antena: LEIATX1230 Parâmetros BCAL/UFPR					
1,27	-0,39	84,40	-0,39	1,16	89,57
Antena: LEIATX1230 Parâmetros NGS					
0,98	2,13	92,45	0,02	-1,09	97,25
Antena: LEIATX1230 Parâmetros BCAL/UFPR					
-0,88	1,14	58,14	-0,02	-2,42	62,56
Antena: LEIATX1230 Parâmetros NGS					
-1,03	1,35	58,32	-0,20	-2,38	55,54

5.2.3 Carga oceânica

O efeito de carga oceânica é causado devido a redistribuição das massas oceânicas na crosta da Terra. Para corrigir este efeito foi utilizado o modelo *Finite Element Solution 2004* (FES2004) (LYARD ET AL, 2006). Tal modelo emprega dados da missão TOPEX/POSEIDON. Este arquivo foi obtido para cada estação utilizada nas redes formadas (os pontos PALM, CAMP, CEM e para as estações IGS e RBMC) no site do *Chalmer Centre for Astrophysics and Space Science* < <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>>.

5.2.4 Coordenadas *a priori* e velocidades *a priori*

As velocidades *a priori* das estações em conjunto com as coordenadas *a priori*, são fundamentais para a obtenção das coordenadas das estações na época dos rastreios. Utilizaram-se as velocidades das estações da rede IGS e RBMC (exceto as estações ILHA, OURI, SPBO, SPAR, SPCA E SCAQ).

5.2.5 Órbitas e parâmetros de orientação da Terra

Utilizaram-se as órbitas precisas finais no formato *Standard Product #3* (*.sp3) e os

parâmetros de orientação da Terra no formato *Earth Rotation Parameter* (*.erp) referidos ao ITRF2008. Estes dados podem ser obtidos no site do IGS < <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/product/>>.

5.2.6 Troposfera e ionosfera

Os efeitos da troposfera são corrigidos através da *Viena Mapping Function* (VMF). No site do *Global Geodetic Observing System* (GGOS) < <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/2014/>> é possível obter *grids* globais de 6 em 6 horas. Os efeitos de 1ª ordem da ionosfera foram corrigidos fazendo o uso de mapas globais da ionosfera. O *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) disponibiliza na página *fip* anônimo do Bernese < <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/2014/>> arquivos diários com os valores de *Total Electron Content Unit* (TECU).

5.3 Bernese Processing Engine (BPE)

O *software Bernese 5.2* dispõe da ferramenta BPE e com ela é possível criar um processamento automático. O *Process Control File* (PCF) é o editor do BPE. Nele constrói-se o *script* do processamento, chamando os programas pertencentes ao *software Bernese 5.2*.

A Figura 10 apresenta um esquema com o BPE adotado para o processamento dos dados GPS das estações envolvidas.

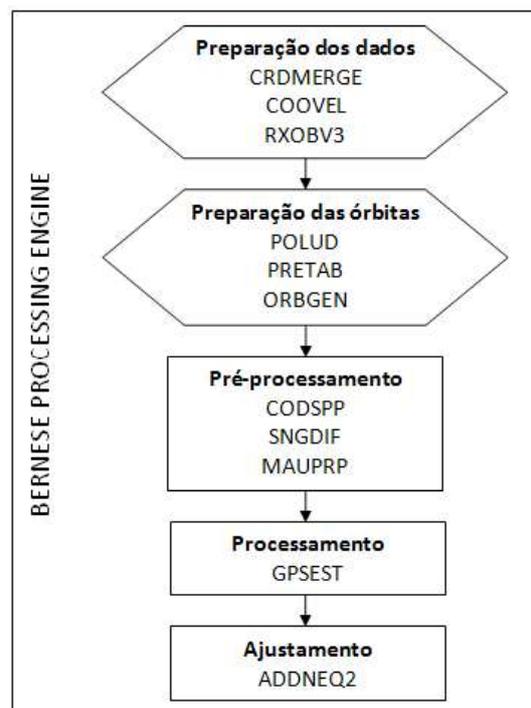


Fig. 10 - Esquema do BPE.

A sequência gerada para os processamentos realizados é descrita a seguir:

- CRDMERGE: cria um único arquivo com coordenadas e velocidades *a priori* das estações utilizadas;
- COOVEL: atualiza as coordenadas da época de referência à época das observações;
- POLUD: importa os parâmetros de rotação da Terra do formato *.erp para o formato *Bernese*;
- PRETAB: importa as órbitas no formato *.sp3 para tabular;
- ORBGEN: gera os arcos de órbitas diários;
- RXOBV3: importa as observações em formato RINEX para o formato *Bernese*;
- CODSP: sincroniza os relógios dos receptores;
- SNGDIF: cria as linhas de base através da simples diferença de fase. Nesta etapa a estratégia empregada foi a OBS-MAX.
- MAUPRP: elimina perdas de ciclos das observações;
- GPSEST: solução flutuante (L_3);
- GPSEST: fixa as ambiguidades;
- GPSEST: estima as primeiras coordenadas;
- GPSEST: solução final das coordenadas;
- ADDNEQ2: gera as coordenadas ajustadas.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

No presente artigo optou-se por realizar a análise dos resultados do efeito de multicaminho, a diferença das altitudes elipsoidais quando empregados os parâmetros da BCAL/UFPR e do NGS, assim como a avaliação das redes formadas. Com estas análises foi possível comprovar a qualidade dos dados obtidos e indicar o melhor resultado alcançado.

6.1 Efeito de Multicaminho nos pontos PALM, CAMP e CEM

A intensidade do efeito de multicaminho é diretamente inerente às características do ambiente em que são realizadas as observações GPS. Desta forma, as análises deste efeito são realizadas em conjunto com os diagramas de obstruções dos pontos. O objetivo da análise deste erro sistemático é verificar se os dados coletados são confiáveis. Este efeito, quando presente, acarreta em erros, independentemente do parâmetro de calibração empregado, assim como do tamanho da rede.

O ponto PALM apresentou menor RMS (*Root Mean Square*) de influência do efeito de multicaminho (menor que 5 mm). Somente três

pequenas áreas da Figura 11 apresentaram RMS maiores do que 15mm. Estas regiões estão nos azimutes 50° à 60° , com elevação de 29° à 33° , azimutes de 120° à 150° , com elevação de 9° à 21° , e no azimute de 355° e elevação de 21° à 33° . Para estes azimutes as obstruções encontradas eram uma casa, um pequeno grupo de árvores além de uma piscina na direção do azimute 135° . Esta última proporcionou reflexão dos sinais GPS.

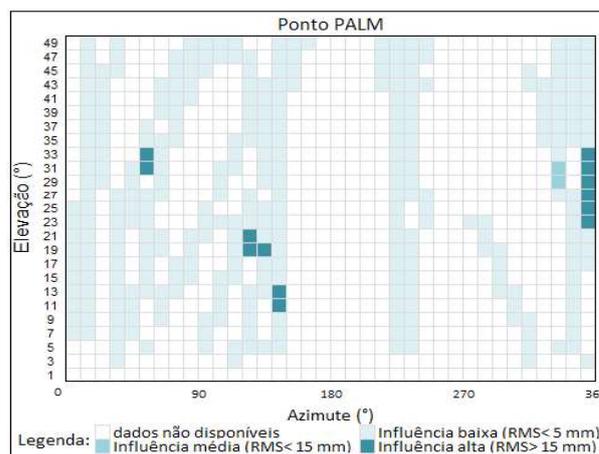


Fig. 11 - Efeito de multicaminho no ponto PALM.

No ponto CAMP foram encontradas os maiores efeitos de multicaminho (Figura 12). Isto era esperado, visto a quantidade de obstruções presentes ao entorno do ponto. É possível notar que a região mais afetada pelo efeito de multicaminho está entre os azimutes 90° e 150° . O maior conjunto de influência alta (RMS maiores do que 15mm) situa-se entre os azimutes 90° e 150° , com elevação de 7° à 43° . Neste intervalo de azimutes foram identificadas obstruções devido à topografia do terreno e a um pequeno grupo de árvores, além de um pequeno lago na direção do azimute 45° .

A Figura 13 ilustra a influência do efeito de multicaminho no ponto CEM. Dos azimutes 0° à 150° a predominância é de influência baixa (RMS menores do que 5mm) deste efeito. A partir do azimute 220° existem duas principais áreas com RMS maiores do que 15mm. A primeira com azimute de até 280° e elevação de 17° à 43° e a segunda de azimute de 320° até 360° com elevação de 13° à 37° . Na primeira região supracitada, foi observado, durante o levantamento de campo, um telhado de uma construção. Na segunda área (de 320° à 360°) existe uma caixa de água. Entre os azimutes 15° e 30° , com elevação de 20° existe uma árvore.

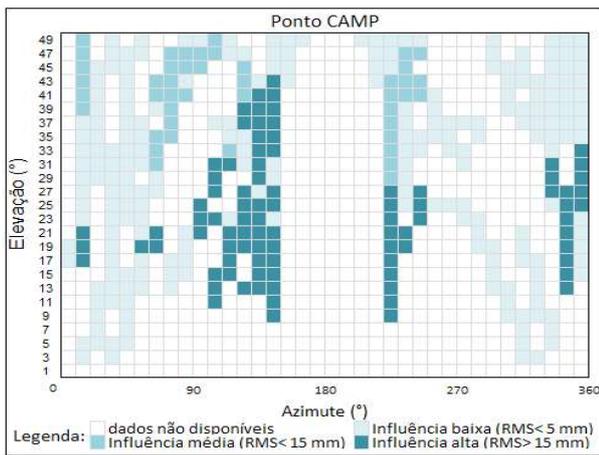


Fig. 12 - Efeito de multicaminho no ponto CAMP.

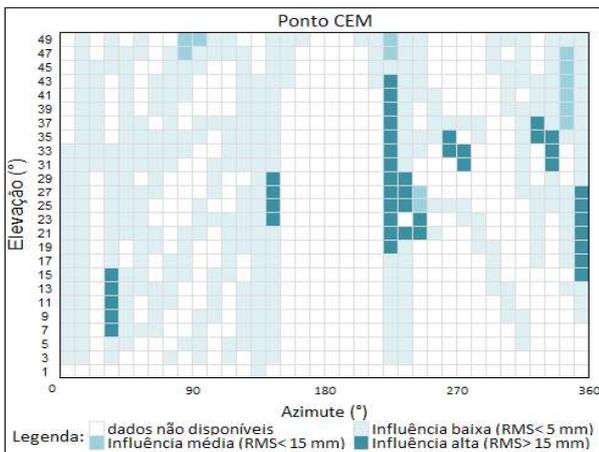


Fig. 13 - Efeito de multicaminho no ponto CEM.

Diante dos resultados obtidos determinou-se que os dados são confiáveis para as posteriores análises.

6.2 Diferenças das altitudes elipsoidais quando usados parâmetros BCAL/UFPR e NGS

Os trabalhos publicados de Huinca (2009), Huinca e Krueger (2011) e Huinca *et al.* (2012) já comprovaram a validade da determinação dos parâmetros de calibração de antenas GPS na BCAL/UFPR. Diante disto as altitudes elipsoidais advindas dos processamentos com estes PCO-PCV são tomadas como referência. Em Werlich (2012) foi comprovado que em linhas de base médias e longas as diferenças, entre altitudes elipsoidais advindas de processamentos com parâmetros NGS e BCAL/UFPR, são maiores que em linhas de base curtas.

Conforme descrito na seção 5.3 a estratégia para a criação das linhas de base foi a OBS-MAX. Ela garante um melhor processamento em redes, pois as linhas de base são criadas com o critério de maior número de observações comuns

em ambas as estações envolvidas. As linhas de base formadas com os pontos de interesse (PALM, CAMP e CEM), constam na Tabela 4.

Tabela 4: Linhas de base formadas

Rede P			
Linha de base (km)			
Dia GPS	21	28	35
PALM	86,4	174,3	174,3
CAMP	73,9	73,9	73,9
CEM	89,6	89,6	89,6
Rede M			
Linha de base (km)			
Dia GPS	21	28	35
PALM	86,4	86,4	86,4
CAMP	73,9	73,9	73,9
CEM	89,6	89,6	89,6
Rede G			
Linha de base (km)			
Dia GPS	21	28	35
PALM	86,4	86,4	86,4
CAMP	55,1	55,1	55,1
CEM	74,8	74,8	74,8

Foram determinadas as coordenadas geodésicas, referenciadas ao IGS08, respectivamente com parâmetros do NGS e da BCAL/UFPR. Neste trabalho, os resultados apresentados para os pontos PALM, CAMP e CEM, são as diferenças das altitudes elipsoidais processadas com ambos os parâmetros (NGS e BCAL/UFPR) para as três redes formadas (P, M e G).

As diferenças das altitudes elipsoidais para o ponto PALM são apresentadas na Figura 14. A rede P apresentou as maiores diferenças nos três dias GPS, com valores de 20,21 mm, 19,30 mm e 17,97 mm. O RMS (Figura 15) para os dias GPS 28 e 35, desta rede, alcançou os maiores valores, 1,8 mm e 1,7 mm, respectivamente. Cabe lembrar que, as linhas de base para estes dias, na rede P, foram de 174,3 km (Tabela 4). As diferenças nas redes M e G nos dias GPS 28 e 35 foram similares, com valores entre 13,72 mm e 16,15 mm respectivamente. Os valores de RMS foram também similares (entre 1,2 mm e 1,6 mm). A menor linha de base formada (86,4 km), no dia GPS 21, o RMS calculado para todas as redes foram os menores, com valores entre 1,2 mm e 1,3 mm.

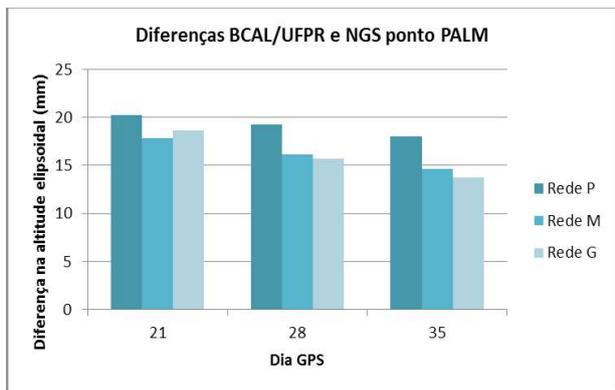


Fig. 14 - Diferenças das altitudes elipsoidais do ponto PALM.

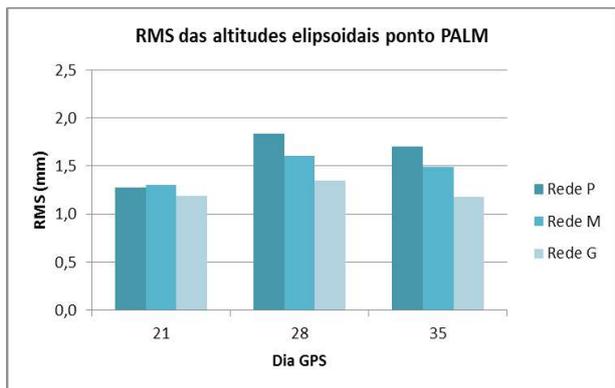


Fig. 15 - RMS das altitudes elipsoidais do ponto PALM.

As diferenças das altitudes elipsoidais para o ponto CAMP são apresentadas na Figura 16. No dia GPS 35, para a rede P, foi encontrada a menor diferença com valor de 4,5 mm. Nesta mesma rede e dia GPS, o RMS calculado foi o maior (2,1 mm) dentre todos os dias e redes. Neste ponto, para os dias 28 e 35, nas redes P, M e G, os RMS (Figura 17) foram os maiores encontrados, dentre os três pontos analisados. Mesmo formando linhas de base de 55,1 km, na rede G, as diferenças alcançadas foram maiores que nas redes P e M (linhas de base de 73,9 km). Ressalta-se que o ponto CAMP, sofreu maior influência do efeito de multicaminho (Figura 12).

Na Figura 18 constam as diferenças das altitudes elipsoidais, entre os processamentos com parâmetros da BCAL/UFPR e do NGS, para o ponto CEM. Neste ponto as diferenças, em todos os dias GPS e redes (P, M e G), apresentaram regularidade, com valores de 11,89 mm a 14,55 mm. Os valores de RMS nos dias GPS 28 e 35, para as redes P e M, foram semelhantes, com valores entre 1,3 mm e 2,1 mm (Figura 19). Para estes dias GPS, nas redes P e M,

as linhas de base formadas foram maiores (89,6 km) que as mesmas criadas na rede G (74,8 km).

O confronto entre as médias das linhas de base formadas, para as três redes (P, M e G), em cada ponto (PALM, CAMP e CEM), e as médias das diferenças das altitudes elipsoidais são apresentadas na Figura 20. Analisando-se esta figura nota-se que, a diferença, entre as altitudes elipsoidais advindas do processamento com os PCO-PCV da BCAL/UFPR e do NGS, aumenta proporcionalmente ao comprimento da linha de base.

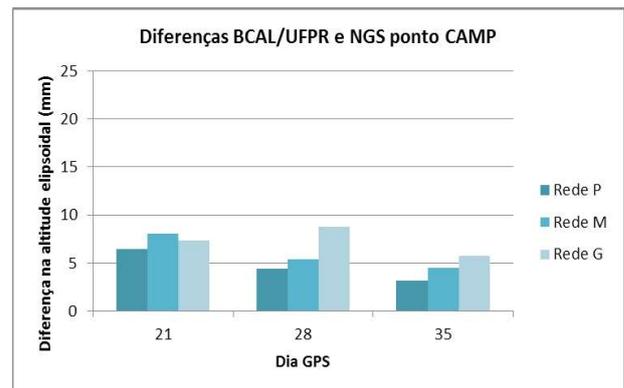


Fig. 16 - Diferenças das altitudes elipsoidais do ponto CAMP.

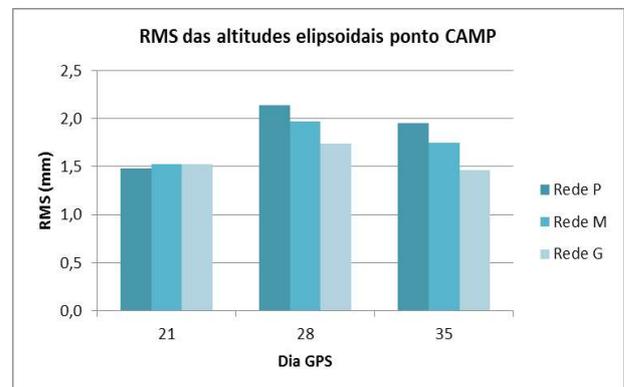


Fig. 17 - RMS das altitudes elipsoidais do ponto CAMP.

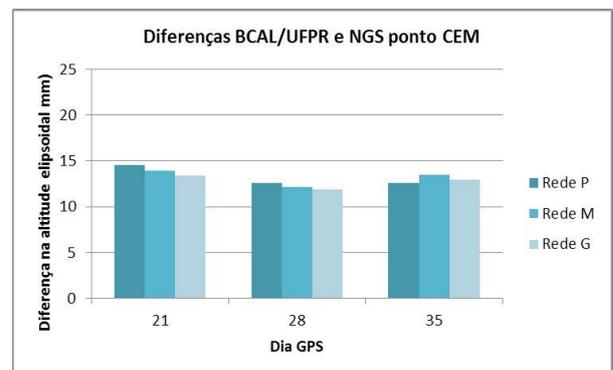


Fig. 18 - Diferenças das altitudes elipsoidais do ponto CEM.

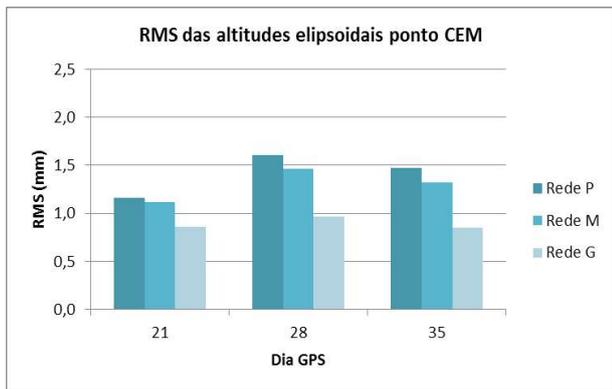


Fig. 19 - RMS das altitudes elipsoidais do ponto CEM.

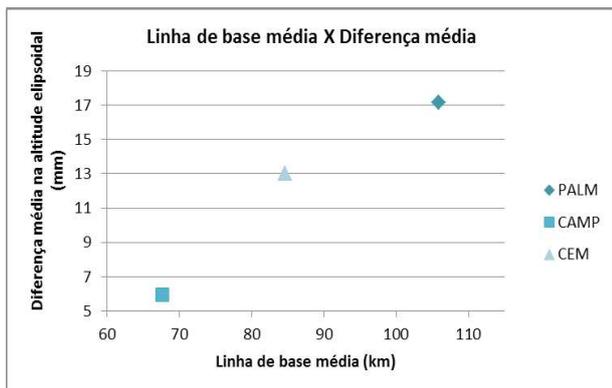


Fig. 20 - Linha de base média versus diferença média.

6.3 Avaliações das redes formadas

Alguns parâmetros indicativos da qualidade dos resultados advindos do último programa (ADDNEQ2) do BPE (seção 5.3) são apresentados na Figura 21, Figura 22 e Figura 23, indicando respectivamente:

O RMS *a posteriori* das redes P, M e G;

O número de graus de liberdade (ν) do ajustamento obtidos nas redes P, M e G;

Teste Qui-quadrado reduzido (χ^2/ν) da qualidade do ajustamento das redes P, M e G. Neste teste o valor desejado é o mais próximo possível de 1 (TAYLOR, 1997).

Analisando os resultados apresentados referentes as redes P, M e G, para os dias GPS 21, 28 e 35, é possível verificar que os RMS das redes M e G, para os três dias GPS, alcançaram valores esperados (< 2 mm), isto por que o RMS *a priori* foi de 2 mm, enquanto que a rede P processada do dia GPS 35 obteve o valor de 2,04 mm. Os graus de liberdade apresentaram valores expressivos (> 330 mil), para a rede G, o que era esperado, diante do número de observações

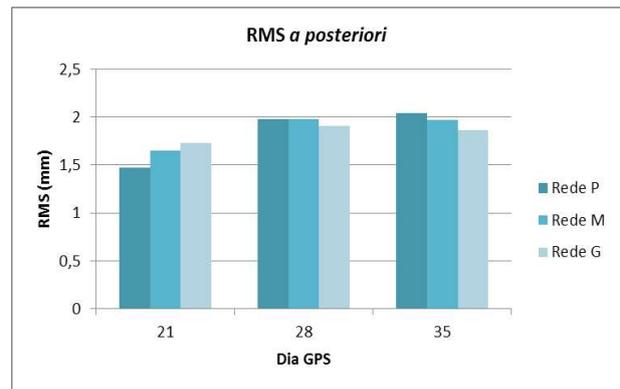


Fig. 21 - RMS a posteriori.

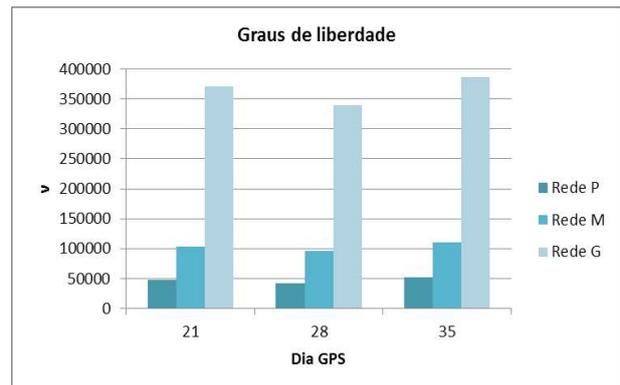


Fig. 22 - Graus de liberdade.

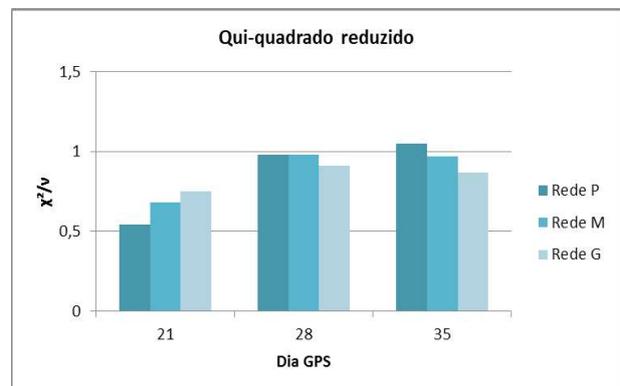


Fig. 23 - Qui-quadrado reduzido.

(17 estações presentes nos processamentos). No entanto, isto não foi o suficiente para melhores resultados no teste χ^2/ν os dias GPS 28 e 35, visto que estes processamentos englobaram estações no Chile e Argentina. Neste teste, para estes dias, as redes P e M, atingiram melhores resultados, com valores entre 0,98 e 1,05. Ainda sobre o teste χ^2/ν , no dia GPS 21 observa-se que os valores não foram satisfatórios para as redes P, M e G, com valores de 0,54, 0,68 e 0,75, respectivamente.

7. CONCLUSÕES

Na análise do efeito de multicaminho foi observado que o ponto que sofreu menos com

este erro sistemático foi o PALM, com influência para grande parte do seu entorno de RMS menor que 5 mm. Isto já era esperado, visto que o ponto PALM apresentou menor quantidade de obstruções em comparação com os pontos CAMP e CEM. Estes alcançaram RMS maiores do que 15 mm, com maior frequência nos diagramas de influência de efeito de multicaminho. Estes resultados mostram que, com relação ao efeito de multicaminho, os dados coletados são confiáveis.

Nas diferenças elipsoidais, quando empregados os parâmetros de calibração de antenas do NGS e da BCAL/UFPR, verificou-se que o ponto PALM atingiu as maiores diferenças para todos os dias (21, 28 e 35) e todas as redes (P, M e G). Os valores ficaram entre 13,72 mm e 20,21 mm. Este ponto obteve uma linha de base média de 105,93 km, a maior entre os pontos estudados. Conclui-se que, suas diferenças ficaram coerentes com resultados já alcançados em outros trabalhos citados na seção 6.2.

Com relação às redes formadas no trabalho proposto, com a estratégia de processamento de dados adotada, foi observado que: através do teste χ^2/v os processamentos das três redes (P, M e G), no dia GPS 21 não alcançaram bons resultados ($< 0,75$); neste mesmo teste, as redes P e M, dos dias GPS 28 e 35 atingiram valores de 0,98, um resultado excelente, visto que quanto mais próximo do valor 1, melhor é o ajustamento da rede; os RMS *a posteriori* para estes dias (28 e 35) nas redes supracitadas (P e M) obtiveram valores bons (1,98 mm), visto que o RMS *a priori* foi de 2 mm.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG), ao Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH) e à Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Este trabalho tem financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) através do projeto número 103/2012, intitulado Otimização de Redes Geodésicas Empregando Estações GPS com Antenas com Parâmetros Próprios Conhecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBIERI, M. J. **Correlação do ruído, multicaminho e ângulo de elevação nas medidas de fase das portadoras GPS**. 57 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

DACH, R.; HUGENTOBLE, U.; FRIDEZ, P.; MEINDL, M. (Eds); 2007: **Bernese GPS Software Version 5.0**. User manual, Astronomical Institute, University of Bern.

FREIBERGER JUNIOR, J. **Investigações Da Calibração Relativa de Antenas GNSS**. 222 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

HUINCA, S. C. M. **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HUINCA, S. C. M.; KRUEGER, C. P. Determinação de Parâmetros de Calibração Relativos em Nível Absoluto de Antenas de Receptores GPS. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63 ed. Especial – Geodésia e Topografia, 2011, p. 649-662.

HUINCA, S. C. M.; KRUEGER, C. P.; MAYER, M.; Knöpfler A.; HECK, B. First Results of Relative Field Calibration of a GPS Antenna at BCAL/UFPR (Baseline Calibration Station for GNSS Antennas at UFPR/Brazil). In: International Association of Geodesy Symposia. (Org.). **Geodesy for Planet Earth**. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2012, v. 136, p. 739-744.

KERSTEN, T.; SHÖN, S. Towards Modelling Phase Center Variations for Multi-Frequency and Multi-GNSS. In: Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). **Proceedings of the 5th ESA Workshop**, 2010, p. 1-8.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, p. 560.

LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T.; FRANCIS, O., 2006. Modelling the global ocean

- tides: modern insights from FES2004. **Ocean Dynamics**, 56:394–415.
- MADER, G. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. **GPS Solutions**, v. 3, n. 1, p. 50-58, 1999.
- MADER, G. A Comparison of Absolute and Relative GPS Antenna Calibrations. **GPS Solutions**, v. 4, n. 4, p. 37-40, 2001.
- National Geodetic Survey (NGS). Disponível em: <<http://www.ngs.noaa.gov/>>. Acesso em: 02/04/2014.
- RAY, J. K.; CANNON, M. E. Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas. In: **ION GPS-98**, Nashville, 1998, p. 15-18.
- SEEBER, G. Real-Time Satellite Positioning on the Centimeter Level in the 21st Century using Permanent Reference Stations. In: **Nordic Geodetic Summer School**, Fevik, Noruega, p. 19-22, 2000.
- SOUZA, E. M. **Efeito de Multicaminho de Alta Frequência no posicionamento Relativo GPS Estático: Detecção e atenuação utilizando Wavelets**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.
- TAYLOR, J. R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. University Science Books, 1997, p. 488.
- WANNINGER, L.; MAY, M. Carrier phase multipath calibration of GPS reference stations. In: **ION GPS 2000**, Salt Lake City, UT, Estados Unidos. **Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation**, 2000, p. 19-22.
- WERLICH, R. M. C. **Análise da influência dos parâmetros de calibração de antenas de receptores GPS no posicionamento de alta precisão**. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.