



Revista Brasileira de Cartografia (2011) N^o 63/5: 589-600
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DA ACURÁCIA NO PPP A PARTIR DA SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES GPS EM CURTOS PERÍODOS DE OCUPAÇÃO

*Analysis of PPP Accuracy from GPS Ambiguity Resolution with Short Periods of
Occupation*

**Chaenne Milene Dourado Alves^{1,2}, João Francisco Galera Monico¹
& Verônica Maria Costa Romão²**

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, Caixa Postal 467
CEP: 19060-900, Presidente Prudente, SP
chaennedourado@yahoo.com.br
galera@fct.unesp.br

²Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação
Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária
CEP: 50670-901, Recife, PE
vcosta@ufpe.br

Recebido em 06 Dezembro, 2010/ Aceito em 26 Fevereiro, 2011
Received on December 06, 2010/ Accepted on February 26, 2011

RESUMO

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é um método de posicionamento GNSS atualmente em evidência na área de Geodésia. Embora seja usual ver citado na literatura que para realizar o PPP apenas um receptor é necessário, na realidade deve-se ter disponível uma boa infraestrutura global, como por exemplo, uma rede de estações como a do IGS, que fornece os produtos GNSS necessários para essa finalidade. As ambiguidades das medidas da fase da onda portadora usualmente são calculadas como solução real (*float*) no processamento de dados no modo PPP e a obtenção da solução inteira (solução fixa) tem sido um desafio contínuo para a comunidade científica geodésica. Quando as ambiguidades são fixadas corretamente, a alta acurácia no PPP é obtida em curtos intervalos de tempo. No presente trabalho são realizadas investigações a respeito da solução de ambiguidades, visando avaliar as melhorias do método em diferentes tempos de rastreamento. Para tanto foi utilizado o algoritmo Ambizap para solucionar as ambiguidades envolvidas entre cinco estações de teste e uma rede GNSS usada suporte. Os resultados obtidos foram comparados com a solução SIRGAS SIR09P01 e verificou-se que a qualidade do posicionamento pode melhorar, em alguns casos significativamente, após a solução das ambiguidades em intervalos de tempo de até uma hora. A componente leste chegou a apresentar melhorias acima de 60% e as componentes norte e vertical melhoraram cerca de 40% em termos de EMQ após a solução das ambiguidades com 30 minutos de dados.

Palavras chaves: Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), Solução de Ambiguidades, Ambizap, GNSS.

ABSTRACT

Precise Point Positioning (PPP) is a GNSS method of positioning currently in evidence in the field of geodesy. Although, normally stated that it can be performed having only one receiver, it is necessary to have available a good global infrastructure, a IGS network for example, in order to provide the GNSS orbits and clock corrections. Usually, the carrier phase ambiguity is computed as a float solution in the PPP data processing and the integer resolution (fixed solution) has been a continuous challenge for the geodetic scientific community. When the ambiguity is fixed correctly, high accuracy is obtained with PPP even at short time intervals. In this paper, investigations are carried out related to the ambiguity resolution in order to obtain improvements with this method in different time span. In order to resolve the ambiguities involved in five test stations and a GNSS support network the Ambizap algorithm was used. The obtained results were compared with the SIRGAS SIR09P01 solution and it was found that in some cases the PPP ambiguity resolution may improve significantly the positioning quality even for time span of up to one hour. The east component reached more than 60% of improvements at the same time that the north and vertical components have improved about 40% in RMS after the ambiguity resolution with 30 minutes of data.

Keywords: Precise Point Positioning, Ambiguity Resolution, Ambizap, GNSS.

1. INTRODUÇÃO

Até pouco tempo atrás, o posicionamento relativo era o único método relacionado ao GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com potencial para fornecer posições com acurácia centimétrica. Esse quadro foi se modificando aos poucos, com o refinamento dos modelos de correção dos erros orbitais e de propagação do sinal, surgindo assim o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Esse método é classificado como posicionamento absoluto, ou seja, requer o uso de apenas um receptor, o que o torna independente de distâncias entre estações e bastante atrativo em termos práticos em comparação ao posicionamento relativo.

No entanto, deve ficar claro que o PPP só é possível quando se dispõe dos produtos necessários para sua realização, como as órbitas precisas e correções para os relógios dos satélites, ou seja, como suporte a esse método existe uma infraestrutura adequada para o fornecimento desses produtos, como por exemplo, a rede IGS (*International GNSS Service*) (IGS, 2009).

Em relação às observáveis originais GNSS utilizadas no PPP e no posicionamento relativo, as medições da fase de batimento da onda portadora, também conhecida somente por fase da onda portadora, são mais precisas que as da pseudodistância (MONICO, 2008). Para que as medidas da fase sejam utilizadas com precisão torna-se necessário conhecer o número inteiro de ciclos da onda portadora entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação. Esse número

inteiro de ciclos é o termo denominado ambiguidade e é difícil de obtê-lo ao nível de apenas uma observável, como é o caso do PPP.

As pesquisas em âmbito mundial relacionadas à solução de ambiguidades no PPP são recentes. Avanços foram alcançados somente nos últimos quatro anos. Diante disso, o mais comum no PPP na forma operacional é que as ambiguidades sejam introduzidas como parâmetros nas equações de observação e o vetor solução seja de números reais (solução real, *float solution*), sem tentativa de solução como vetor inteiro (solução inteira, *fix solution*). À medida que o tempo de observação vai aumentando, tendo maior número de épocas acumuladas, as ambiguidades tendem a convergir e estabilizar em torno de um determinado valor.

A solução das ambiguidades como vetor de números reais pode proporcionar resultados satisfatórios, mas dependendo do tipo de trabalho que está sendo realizado, requererá um longo período de ocupação. Logo, para trabalhos que exigem alta acurácia, com requisito de bom desempenho em termos de tempo, seria muito produtivo dispor de um método de solução de ambiguidades das medições da fase da onda portadora. Caso contrário, a única opção seria um longo período de ocupação.

No contexto de solução de ambiguidades, no posicionamento relativo várias alternativas foram desenvolvidas para esta finalidade. Essas técnicas são baseadas na combinação linear da dupla diferença (DD) das observáveis GNSS, na qual a ambiguidade tem a característica de um número

inteiro. Essa combinação não é possível de ser realizada com observáveis de apenas um receptor; logo, essas técnicas não podem ser aplicadas no PPP.

Com o trabalho de solução de ambiguidades GPS aplicada a linhas de base geodésicas longas, Blewitt (1989) introduz o conceito de redes geodésicas, onde ambiguidades podem ser sequencialmente resolvidas por linhas de base a partir de soluções de rede. A solução de ambiguidades no PPP no contexto de redes GNSS até então era um assunto com poucas publicações a respeito. Nesse último ano, muitos trabalhos estão sendo desenvolvidos e o número de publicações aumentando consideravelmente. Desta forma, alguns trabalhos relacionados à solução de ambiguidades no PPP podem ser citados como Blewitt (2008), Laurichesse *et al.* (2009), Geng *et al.* (2009), e Collins *et al.* (2010).

Em trabalho desenvolvido por Geng *et al.* (2009), apresenta-se o método de solução de ambiguidades no PPP a partir da estimação com antecedência dos componentes de atraso de *hardware* não calibrados dentro de uma rede de estações. Esta metodologia foi testada para conjuntos de observações de uma hora.

Blewitt (2008) desenvolveu um algoritmo, denominado Ambizap, para solução de ambiguidades no PPP, em modo pós-processado, no contexto de redes GNSS. É possível que esse algoritmo permita a solução de ambiguidades com curtos períodos de observação. Desta forma, as investigações neste trabalho foram realizadas com a utilização desse algoritmo, motivadas pela possibilidade de se verificar se a solução de ambiguidades no PPP proporciona boa acurácia em um curto período de observação.

O presente trabalho apresenta uma contribuição para um melhor entendimento do PPP através de investigações da solução das ambiguidades GPS com diferentes tempos de rastreio, tendo como suporte um conjunto de estações operando simultaneamente. As investigações também se estendem ao tempo mínimo necessário para alcançar acurácia posicional da ordem centimétrica, levando em consideração a convergência das ambiguidades e a influência das distâncias das estações da rede de suporte em relação ao usuário.

2. POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

O PPP tem se mostrado uma poderosa ferramenta para aplicações geodésicas e geodinâmicas, dentre as quais se podem citar o controle geodésico, monitoramento de deformações locais e globais, dinâmica do movimento das placas litosféricas, levantamentos cadastrais e outras aplicações como, por exemplo, na aerofotogrametria. Estudos têm se intensificado para transformá-lo em um método totalmente operacional e de uso geral, com acurácia ao nível do centímetro, chegando ao milímetro.

O PPP é realizado de modo absoluto, ou seja, com apenas um receptor. Nesse método se utilizam as observações da pseudodistância e da fase da onda portadora. Igualmente se faz uso de efemérides precisas e correções para os relógios dos satélites. Os erros que afetam as observáveis GNSS se propagam diretamente para as coordenadas do ponto, logo, é necessário que sejam considerados e tratados (BERNESE, 2007). As equações da pseudodistância e da fase da onda portadora podem ser escritas conforme abaixo (adaptado de MONICO, 2008):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r}^s \quad (1)$$

$$\phi_r^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (\phi^s(t_0) - \phi_r(t_0)) + \bar{N}_r^s + \varepsilon_{\phi_r}^s \quad (2)$$

onde ρ_r^s é a distância geométrica entre o centro de fase da antena do receptor, no instante de recepção do sinal, e do satélite no instante de transmissão do sinal; c a velocidade da luz no vácuo; dt_r o erro do relógio do receptor; dt^s o erro do relógio do satélite; I_r^s o efeito ionosférico; T_r^s o efeito troposférico; dm_r^s o erro de multicaminho; $\varepsilon_{PD_r}^s$ o resíduo da pseudodistância contendo os erros não modelados; f a frequência da onda portadora; $\phi^s(t_0)$ a fase da portadora gerada no satélite s e recebida no receptor r na época de referência t_0 ; $\phi_r(t_0)$ a fase gerada no receptor na época de referência t_0 ; \bar{N}_r^s a ambiguidade inteira e os componentes do atraso de *hardware*; $\varepsilon_{\phi_r}^s$ são erros não modelados na fase da onda portadora.

A ideia fundamental do PPP é a utilização de orbitas precisas e relógios dos satélites estimados com base em observações de uma rede global de confiança e alta qualidade, como por exemplo, a rede do IGS. Estas informações são tomadas para resolver parâmetros de estações em qualquer local do mundo sem a necessidade de formar dados diferenciados a partir de estações de referência. Trata-se de parâmetros globais (SEEBER, 2003). O desenvolvimento do PPP tornou-se possível com a disponibilização e facilidade de acesso a esses produtos, ou seja, com o desenvolvimento de uma infraestrutura global, organizada e de qualidade, disponível ao usuário.

Tendo estações de monitoramento contínuo distribuídas no mundo e vários centros de análises, o IGS tem fornecido, sem custo, produtos como órbitas pós-processadas e correções para os relógios dos satélites, bem como modelo global para erros provenientes da ionosfera (IONEX) e modelo para correção residual da troposfera, com rapidez e precisão.

O IGS produz três tipos de efemérides e correções para os relógios: IGS final, disponível com doze dias de latência; IGS rápida, com 17 horas de latência; IGS ultra-rápida, disponível quatro vezes por dia, podendo essa ser observada com latência de 3 horas, ou predita, disponível em tempo real. Maiores informações podem ser encontradas em IGS (2009) onde é feita uma descrição de cada produto disponibilizado e suas respectivas precisões. Atualmente, o IGS tem como referencial das estações envolvidas na produção das órbitas e correções dos relógios o IGS05, uma realização do ITRF2005. O JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) também disponibiliza órbitas e correções para os relógios dos satélites. Os produtos JPL podem ser *FlinnR* (órbitas fiduciais e correções para os relógios dos satélites) e *FlinnR_nf* (órbitas não fiduciais e correções para os relógios dos satélites). Esses produtos são postados com 11 dias de latência. Os produtos JPL encontram-se disponíveis em <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GPS_Products/>.

3. SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES NO PPP

Nas medições da fase da onda portadora estão presentes as ambiguidades, isto é, o número inteiro desconhecido de comprimentos de onda entre as antenas do satélite e do receptor. Esse número inteiro precisa ser determinado com técnicas

adequadas para explorar o potencial total de precisão das medições da fase da onda portadora (SEEBER, 2003). A determinação das ambiguidades é um problema atual no posicionamento geodésico. A interpretação geométrica da ambiguidade está ilustrada na Figura 1.

A não ser que seja aplicada uma estratégia que invoca o número inteiro de comprimentos de onda, as soluções dos parâmetros geodésicos são consideravelmente enfraquecidas por sua correlação com as ambiguidades envolvidas na medida da fase. O problema da resolução de ambiguidades como vetor de números inteiros é conhecido como solução de ambiguidades (*ambiguity resolution*) ou fixação das ambiguidades (*bias fixing*) (BLEWITT, 1989).

Os principais fatores que dificultam a solução inteira do vetor das ambiguidades são os componentes não calibrados do atraso de *hardware* (equação 3). Sabe-se que eles são estáveis no nível de um nanosegundo, ou melhor, mas como não são inteiros e difíceis de separar das ambiguidades, a sua presença impede a resolução do número inteiro de ciclos da fase da onda portadora (BLEWITT, 1989). Assume-se no PPP em geral que eles sejam absorvidos pelas ambiguidades no processamento dos dados (GE *et al.*, 2007).

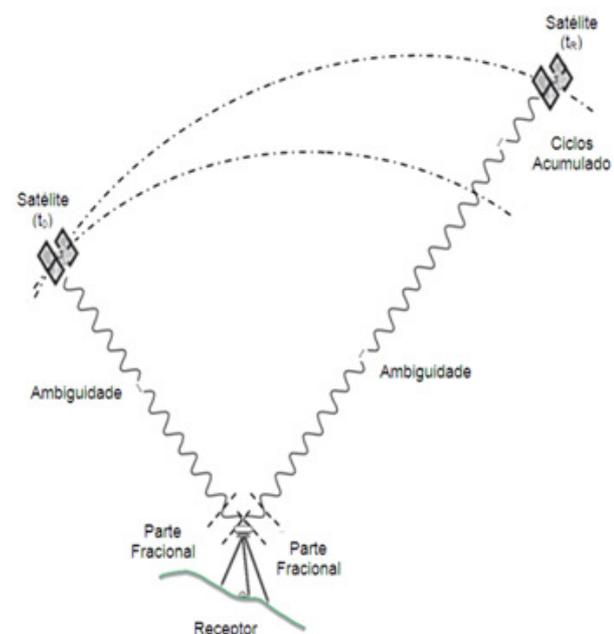


Fig. 1 - Interpretação geométrica da ambiguidade.

O termo \overline{N}_r^s , presente na equação (2), é composto por:

$$\overline{N}_r^s = N_r^s + \delta\phi_r - \delta\phi^s \quad (3)$$

onde N_r^s são as ambiguidades inteiras das medições da fase da onda portadora; $\delta\phi_r$ são os componentes não calibrados do atraso de *hardware* originados no receptor, assumido como sendo comum a todos os canais por satélite; e $\delta\phi^s$ são os componentes não calibrados do atraso de *hardware* originados no transmissor do satélite. A realização da DD das ambiguidades entre dois receptores (r, l) e dois satélites (s, j) resulta na eliminação dos atrasos de *hardware* não calibrados (BLEWITT, 1989), conforme mostrado na equação (4):

$$\begin{aligned} \overline{N}_{r,l}^{s,j} &= (\overline{N}_r^s - \overline{N}_l^j) - (\overline{N}_i^s - \overline{N}_i^j) \\ \overline{N}_{r,l}^{s,j} &= (N_r^s + \delta\phi_r - \delta\phi^s) - (N_l^j + \delta\phi_l - \delta\phi^j) - \\ &\quad (N_i^s + \delta\phi_i - \delta\phi^s) + (N_i^j + \delta\phi_i - \delta\phi^j) \quad (4) \\ \overline{N}_{r,l}^{s,j} &= (N_r^s - N_l^j) - (N_i^s - N_i^j) \\ \overline{N}_{r,l}^{s,j} &= N_{r,l}^{s,j} \end{aligned}$$

O processo de solução das DD de ambiguidades divide-se em duas partes: a estimativa ótima das DD de ambiguidades e a validação que objetiva verificar se as estimativas podem ser aceitas estatisticamente (TEUNISSEN, 1988).

O processo de estimação é baseado em três etapas. Na primeira as ambiguidades são estimadas, juntamente com os outros parâmetros, como números reais (\hat{n}). Na segunda etapa as DD de ambiguidades inteiras são obtidas e na terceira etapa a solução fixa é calculada com a influência da injunção das DD de ambiguidades inteiras (DE JONGE e TIBERIUS, 1996).

Com a solução real se obtêm os elementos necessários para a solução inteira das ambiguidades. A solução real (coordenadas da estação (\hat{x}) e ambiguidades como números reais) e sua respectiva matriz variância-covariância - MVC (\hat{Q}) são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{n} \end{bmatrix}, \hat{Q} = \begin{bmatrix} Q_{\hat{x}} & Q_{\hat{x}\hat{n}} \\ Q_{\hat{n}\hat{x}} & Q_{\hat{n}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Uma vez estimado o vetor de ambiguidades no espaço dos números reais (\hat{n}) e o vetor fixo (\tilde{n})

correspondente resolvido após a aplicação de algum método de solução das ambiguidades, pode-se introduzir a injunção no ajustamento (MONICO, 2008):

$$C\hat{x} - \tilde{n} = 0 \quad (6)$$

onde:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & & & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As três primeiras colunas de C estão associadas com as coordenadas da estação a serem determinadas, as quais não fazem parte da injunção, e as restantes estão associadas com as ambiguidades. A influência da injunção em que as ambiguidades são fixadas como números inteiros sobre as coordenadas da estação é dada por (MONICO, 2008):

$$\tilde{x} = \hat{x} - Q_{\hat{x}\hat{n}} Q_{\hat{n}}^{-1} (\hat{n} - \tilde{n}) \quad (7)$$

A MVC para a solução inteira é calculada a partir de:

$$Q_{\tilde{x}} = Q_{\hat{x}} - Q_{\hat{x}\hat{n}} Q_{\hat{n}}^{-1} Q_{\hat{n}\hat{x}} \quad (8)$$

A validação da solução inteira encontrada é uma etapa tão importante quanto a etapa da estimação, pois mesmo quando se utiliza um estimador ótimo pode-se obter uma solução incorreta. Essa etapa é para inferir se a solução encontrada pode ser aceita.

Os testes de discriminação são adotados na prática para validação do vetor inteiro das ambiguidades. Esses testes visam comparar a probabilidade da solução fixa, que foi considerada, correta com outros conjuntos de solução dos vetores de ambiguidades inteiras. Se o teste for aceito então o vetor das ambiguidades tem a mais alta probabilidade entre todos os candidatos de ser o correto (SOUZA e MONICO, 2005).

Como no PPP se utiliza apenas um receptor, uma rede de estações de operação contínua pode funcionar como um suporte e ao combinar as soluções de PPP em simultâneas estações observadas, as DD das ambiguidades podem ser definidas e para posterior tentativa de fixação.

Considerando a existência das redes GNSS alguns métodos de solução de ambiguidades no

contexto do PPP têm sido desenvolvidos. Esses métodos realizam a DD das ambiguidades entre as estações da rede e a estação que se deseja solucionar as ambiguidades, a fim de eliminar ou estimar os componentes do atraso de *hardware* não calibrados e possibilitar a fixação das ambiguidades. O método utilizado neste trabalho é baseado na eliminação dos componentes que dificultam a solução de ambiguidades, através da DD das ambiguidades entre estações, a partir da formação de linhas de bases com auxílio de uma rede GNSS. Esse método foi utilizado a partir do algoritmo denominado de Ambizap (soluções rápidas de ambiguidades) desenvolvido por Blewitt (2008).

O Ambizap foi desenvolvido com o objetivo de solucionar ambiguidades envolvidas entre estações pertencentes a uma rede global, que tiveram suas soluções iniciais obtidas por PPP, de forma muito rápida (rede de aproximadamente 3.000 estações, solução de 5 segundos por estação com um processador de 3 GHz). Esse algoritmo foi codificado, funciona em ambiente Linux e está disponível para pesquisadores e usuários no endereço <ftp://gneiss.nbm.g.unr.edu/ambizap/>.

Uma propriedade importante do Ambizap é a adição, na solução de rede, de dados de uma estação extra (fora da rede), de forma muito simples e rápida. No contexto deste trabalho, isso tornou possível a simulação de uma estação do usuário sendo adicionada à rede. O Ambizap possui um módulo de reciclagem que faz com que não seja necessário o reprocessamento de toda a rede quando uma estação é adicionada.

Outra propriedade do programa é que a porcentagem mínima de fixação das ambiguidades pode ser determinada previamente. É recomendado que sejam considerados como solução fixa os casos com mais de 50% das ambiguidades solucionadas. As soluções que não atingem a porcentagem mínima de fixação estabelecida retornam para os valores iniciais de ambiguidades reais (valores não inteiros – solução *float*).

Os arquivos de entrada do Ambizap são os arquivos resultantes do processamento dos dados da estação pelo método PPP, como o vetor de coordenadas (X, Y, Z) com seus respectivos desvios e covariâncias e a solução de todos os parâmetros estimados, também com as covariâncias, dentre os quais se encontram as ambiguidades como vetor de números reais.

Ao iniciar o Ambizap ele interpreta a linha de comando, de acordo as opções selecionadas no comando de entrada, cria os diretórios de solução e reciclagem, e então verifica se já existem linhas de base solucionadas. Se existirem soluções na rede inicia-se o processo de reciclagem. É nessa etapa que uma estação com ambiguidades não fixas pode ser adicionada a rede para ter suas ambiguidades fixas sem que todas as estações da rede, com ambiguidades já solucionadas, precisem ser reprocessadas.

Na etapa seguinte é realizada uma contagem do número de estações que irão participar do processo de solução de ambiguidades e é efetuado o cálculo do número máximo de linhas de base para formação das DD de ambiguidades. O processo de seleção das linhas de base é então iniciado a partir da triangulação de *Delauney* (RENKA, 1997), baseando-se em *n* polígonos centrados em cada estação, definindo o vizinho mais próximo possível para cada ponto. Dando prosseguimento, a solução de ambiguidades a partir da DD das linhas de base é iniciada.

O resultado do processamento com o Ambizap é um conjunto de coordenadas com as ambiguidades solucionadas, sua respectiva MVC e desvio padrão para cada estação de forma individual. Para mais detalhes sobre o Ambizap consultar Blewitt (2008).

É importante salientar que a obtenção de resultados satisfatórios com o método de solução de ambiguidades no PPP é dependente de como os erros que afetam as observáveis GNSS são tratados, ou seja, o sucesso do método está relacionado com os modelos precisos, efemérides e correções dos relógios dos satélites utilizados.

4. METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizados dados das estações ativas da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e da Rede GNSS-SP, entre os dias 08 e 14 de agosto de 2009, totalizando 67 estações. Destas 67 estações, 62 compuseram a rede suporte do trabalho. Para cada uma das estações da rede suporte foi processado um arquivo de dados de 24 horas para cada um dos sete dias, intervalo de coleta de 15s, o que correspondeu a 434 arquivos. Cinco estações das 67 foram selecionadas para realização dos experimentos (NAUS, RECF, BRAZ, PPTE e POAL), as quais foram denominadas de estações de teste.

As estações de teste foram selecionadas de forma a contemplar as diversas regiões do País, considerando que cada região possui características diferentes que podem ou não influenciar no decorrer do processo. Tentou-se também reproduzir as possíveis dificuldades a serem encontradas por usuários, como distâncias de estações da rede e utilização do método, estando ele situado em qualquer região do país. No total foram realizados seis experimentos com dados de diferentes tempos de rastreamento. Para cada estação de teste foram processados arquivos de dados de 20, 25, 30, 40, 50 e 60 minutos, para cada hora do dia, tomando como base o início do arquivo. Contabilizando para cinco estações em sete dias, foram processados 5.040 arquivos das estações de teste, conforme mostra a Figura 2.

O *software* utilizado no processamento dos dados GPS foi o GIPSY (*GPS Inferred Positioning System*), versão 5.0, mediante acordo da FCT/UNESP e o *California Institute of Technology/JPL*.

O GIPSY é um *software* científico, composto por vários programas e utilitários que realizam vários tipos de processamento (GREGORIUS, 1996). Para o processamento dos dados por PPP utilizou-se o programa do GIPSY chamado *gd2p.pl (GPS Data 2 Position)*, escrito em linguagem Perl, com alto nível em processamento de dados para uma única estação.

A estratégia metodológica aplicada para se alcançar os objetivos do trabalho consistiu em cinco etapas. Na primeira etapa realizou-se o

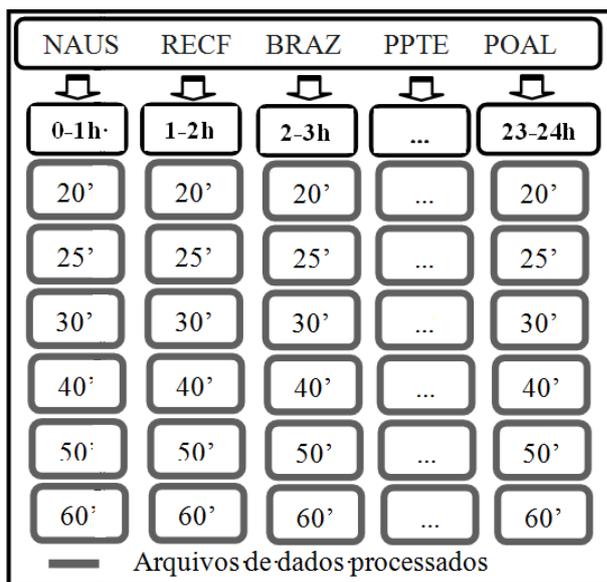


Fig. 2 - Arquivos de dados processados nos experimentos.

processamento dos dados contidos nos arquivos de 24 horas das 62 estações da rede suporte pelo método PPP utilizando o programa *gd2p.pl*. Com isto, ficaram disponíveis os elementos necessários para a utilização do *Ambizap*.

A segunda etapa consistiu na utilização do *Ambizap* para solução de ambiguidades das estações da rede suporte, em cada linha de base formada, através das DDs das ambiguidades. Em uma terceira etapa, os arquivos de 20, 25, 30, 40, 50, 60 minutos de cada estação de teste, para cada um dos sete dias, foram processados individualmente com o programa *gd2p.pl*.

Dando prosseguimento, em uma quarta etapa foram processados com o *Ambizap* os arquivos das estações de teste, um por vez, em conjunto com as estações da rede suporte. Esta etapa foi uma simulação com cada arquivo destas estações de teste representando arquivos de uma estação de usuário sendo adicionada à rede suporte, a fim de solucionar as ambiguidades envolvidas a cada linha de base formada.

Finalmente, na quinta e última etapa deste trabalho, de posse dos resultados obtidos dos processamentos das etapas anteriores referentes às estações de teste, realizou-se a análise das melhorias repercutidas no método PPP através do comparativo das soluções de ambiguidades reais (*float*) e das soluções de ambiguidades inteiras (*fixed*) com as coordenadas adotadas como referência. Estas, vinculadas ao SIRGAS, na época 2005,0, foram obtidas através das soluções multi- anuais acumuladas (*SIR09P01*) da rede SIRGAS-CON, que resultaram do processamento dos dados no período de janeiro de 2000 a janeiro de 2009, cujos arquivos de coordenadas (*SIR09P01.CRD*)

Tabela 1. Distâncias médias entre as estações de teste e as estações da rede suporte.

ESTAÇÕES DE TESTE E AS ESTAÇÕES DA REDE SUPORTE.

Estações de teste	Distância (km)
RECF	145
PPTE	154
POAL	270
BRAZ	360
NAUS	655

velocidades (SIR09P01.VEL) encontram-se disponíveis no endereço <<http://www.sirgas.org/>>. As coordenadas da solução *SIR09P01* foram atualizadas para a época 2009,62 e todas as análises foram realizadas com as coordenadas referidas a essa época.

5. EXPERIMENTOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

A Tabela 1 mostra as distâncias médias calculadas entre as estações de teste e as estações da rede suporte. Essas distâncias foram calculadas na etapa referente ao processo de formação de linhas de base para posterior solução das ambiguidades.

Os resultados obtidos nas estações POAL e NAUS são apresentados em função das componentes leste, norte e vertical nas Figuras 3 a 8. A estação POAL obteve os melhores resultados e a estação NAUS os resultados menos satisfatórios.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos, para as cinco estações de teste, com relação o EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras, as melhorias obtidas após a solução das ambiguidades e as respectivas porcentagens de fixação.

A partir da Tabela 2 e com auxílio Figura 3 pode-se verificar que o método de solução de ambiguidades proporcionou uma melhoria no EMQ da componente leste na estação POAL a partir de 20 minutos de dados. Na estação NAUS as melhorias foram mínimas, 0,4 % para esta

componente, e desta forma consideradas pouco significativas (Figura 4).

Para a componente norte, na estação POAL pode-se considerar que as melhorias em EMQ foram significativas a partir de 25 minutos, como pode ser confirmado pela Figura 5 e Tabela 2. A estação NAUS apresentou maiores valores de EMQ nessa componente, quando comparada com a estação POAL. Na Figura 6 pode-se observar que os resultados para a componente norte na estação NAUS não apresentaram melhorias que podem ser consideradas significativas com o método aplicado.

Para a componente vertical, na estação POAL os resultados foram semelhantes às componentes leste e norte (Figura 7). A estação NAUS novamente não apresentou resultados satisfatórios como pode ser visto nas Tabelas 2 e 3 e na Figura 8.

Na Tabela 2 também se pode verificar que para o EMQ, nas estações PPTE, RECF, BRAZ e NAUS, com vinte minutos de dados na resultante 3D, não houve melhorias na solução de ambiguidades inteiras. Com relação à estação POAL obteve-se 5,9% de melhorias na resultante 3D após solução das ambiguidades.

Com 25 minutos de dados a estação POAL apresentou 17% de melhoria após a solução das ambiguidades na resultante 3D. As outras estações não obtiveram resultados melhores com a solução das ambiguidades com esse tempo de dados.

Com 30 minutos de dados observa-se que na estação POAL, o EMQ da resultante 3D foi 39,8% melhor na solução inteira, quando

Tabela 2. EMQ calculado para as soluções reais e inteiras em comparação com as fornecidas pela solução SIR09P01 para 20, 25 e 30 minutos de dados.

EQM	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				% Fix	%melhoria			
	e	n	u	3D	e	n	u	3D		e	n	u	3D
20 min													
PPTE	128,8	64	350,6	379	129,1	64,9	357,1	385,2	81,6	-0,3	-1,4	-1,8	-1,6
RECF	165,9	71,8	251,5	309,7	166,5	75,2	279,4	333,8	80,4	-0,4	-4,6	-11,1	-7,8
BRAZ	122,5	45	265,7	296	129,7	54,5	304,7	335,6	77,2	-5,8	-21,2	-14,7	-13,4
POAL	96,7	46,5	196,4	223,8	84,7	46	187,3	210,6	87,6	12,4	1,1	4,7	5,9
NAUS	172,6	87,9	209,9	285,6	172	88	209,8	285,2	18,3	0,4	-0,1	0,1	0,1
25 min													
PPTE	110,8	56,4	222,9	255,2	103,6	60,9	214,2	245,6	87,4	6,5	-7,8	3,9	3,7
RECF	143,3	54,1	187,3	241,9	131,3	53,4	226,8	267,5	84,2	8,4	1,3	-21,1	-10,6
BRAZ	98,6	36,4	212,2	236,8	84,5	41,2	235,6	253,6	79,3	14,4	-13,1	-11	-7,1
POAL	82,5	37,8	159,1	183,2	57,3	28,6	138,8	152,9	90,1	30,6	24,3	12,7	16,5
NAUS	157,5	80,5	151,9	233,2	156,9	80,5	156,7	235,9	17,8	0,4	0	-3,1	-1,2
30 min													
PPTE	90,7	39,5	180,7	206	76,6	36,3	177,2	196,4	89,1	15,6	8,3	2	4,7
RECF	133,1	40,6	150,4	204,9	119,5	38,7	147,8	194	84,5	10,3	4,6	1,7	5,3
BRAZ	86,5	31,4	150,8	176,7	70,2	31	145,9	164,8	80,1	18,8	1,2	3,2	6,7
POAL	70,6	33,2	115,1	139,1	39,5	22,4	70,3	83,6	90,2	44	32,5	39	39,8
NAUS	138,5	85,1	128,8	207,4	137,5	85	129,8	207,3	17,7	0,7	0,2	-0,8	0

comparada com o da solução real. As outras estações, com exceção da estação NAUS, também passaram a apresentar melhorias na resultante 3D com esse tempo de dados.

Na Tabela 3 verifica-se que com 40, 50 e 60 minutos de dados continua-se a obter melhorias nas estações PPTE, BRAZ e POAL. A estação NAUS continua a não obter resultados satisfatórios. A

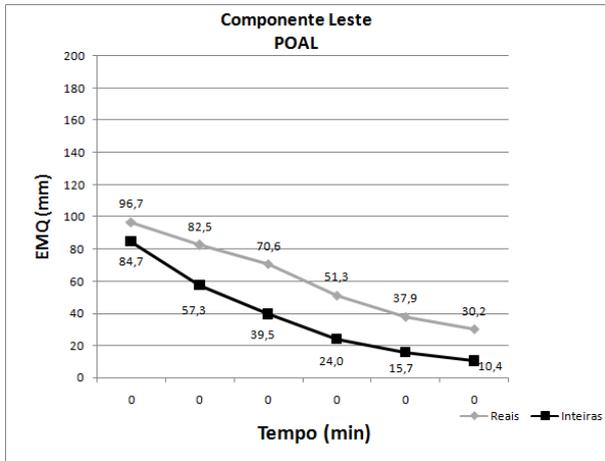


Fig. 3 – EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras - componente leste - POAL.

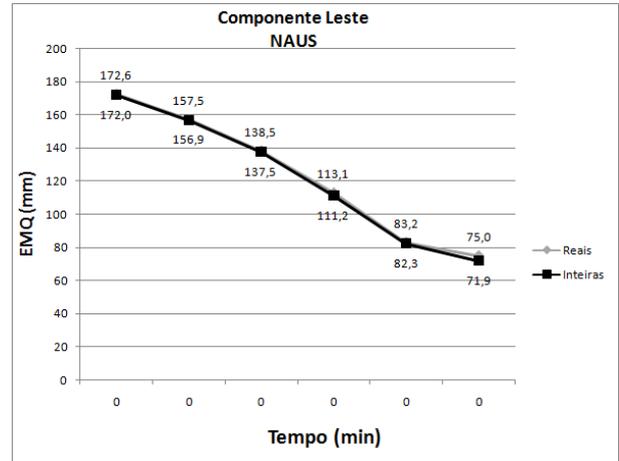


Fig. 4 – EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras - componente leste - NAUS.

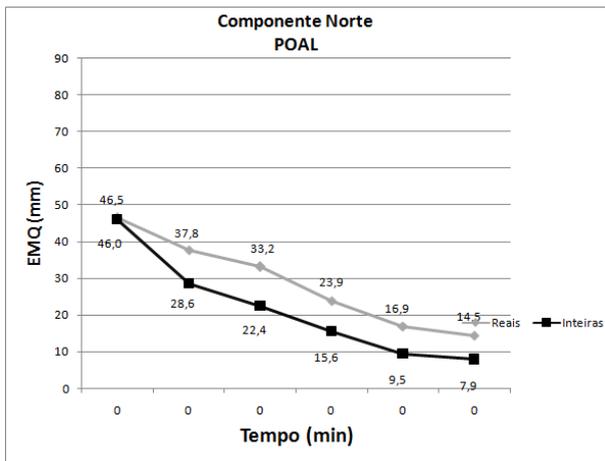


Fig. 5 – EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras - componente norte - POAL.

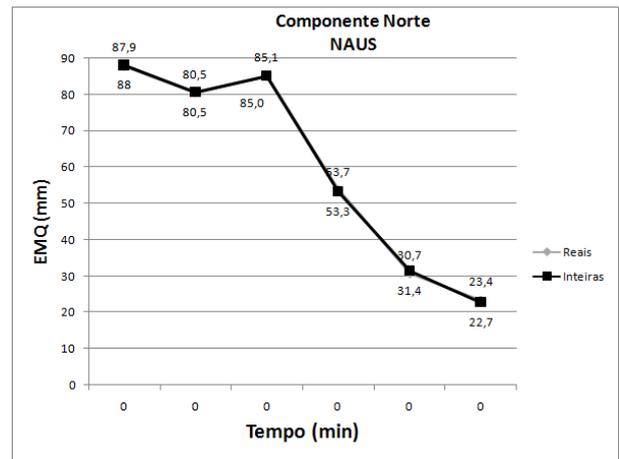


Fig. 6 – EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras - componente norte - NAUS.

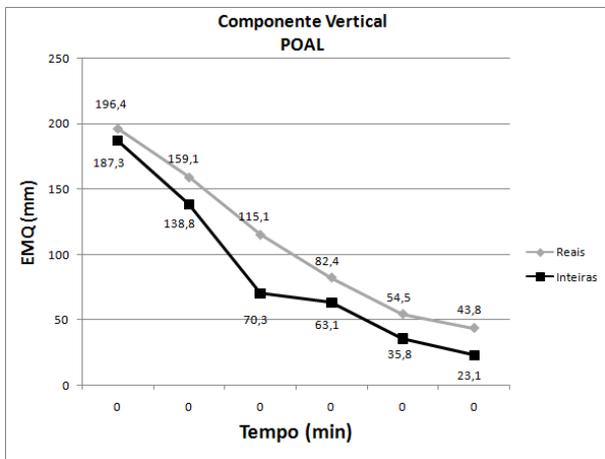


Fig. 7 – EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras - componente vertical - POAL

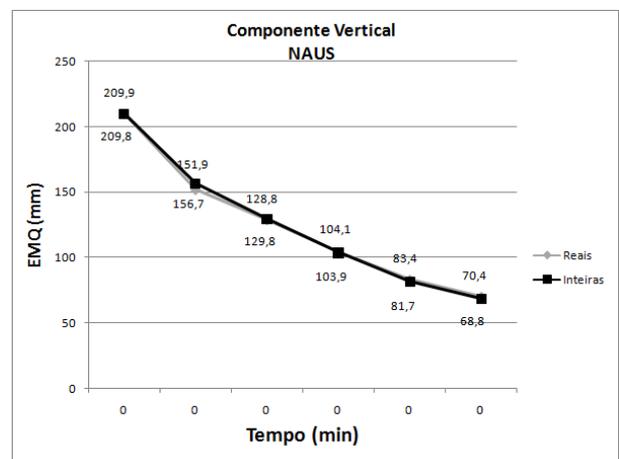


Fig. 8 – EMQ das soluções de ambiguidades reais e inteiras -- componente vertical - NAUS.

estação RECF, com 40 minutos de dados, apresentou um comportamento não esperado, o que pode ter sido ocasionado pelas perdas de sinais dos satélites que ocorreram nas primeiras horas do dia 08 de agosto de 2009. Com 50 e 60 minutos de dados o EMQ, na resultante 3D, para as soluções de ambiguidades inteiras nesta estação voltou a apresentar resultados satisfatórios com melhorias por volta de 20%.

Analisando os resultados em função das distâncias apresentadas na Tabela 1, verifica-se que a estação NAUS, na qual as Figuras 4, 6 e 8 mostram diferenças pouco significativas entre as soluções de ambiguidades reais e inteiras, encontra-se, em média, 655 km distante das estações da rede. Isso é um indicativo do motivo pela qual o comportamento desta estação foi diferente das demais, sendo uma possível causa da não solução de ambiguidades a partir da metodologia utilizada. Contudo, considerando que a estação POAL apresentou melhores resultados e esta não é a estação mais próxima da rede, conforme mostra a Tabela 1, não se pode determinar a influência da distância, entre as estações e a rede, no processo de solução das ambiguidades. As condições atmosféricas das regiões norte e sul também podem ser um fator de influência nos resultados obtidos com as estações NAUS e POAL, respectivamente. Entretanto, com os dados utilizados e resultados obtidos, não se pode confirmar essa hipótese.

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que, no geral, com 30 minutos de dados

o método de solução de ambiguidades aplicado passa a proporcionar resultados satisfatórios no que diz respeito a porcentagens de melhoria das soluções inteiras em relação às soluções de ambiguidades reais.

Com relação ao desvio-padrão, este melhorou cerca de 70% após a solução de ambiguidades em todas as estações analisadas. Em alguns casos alcançou valores abaixo de 1 mm, o que já era de se esperar, considerando que as estimativas das soluções iniciais (reais) são consideravelmente otimistas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas com os experimentos com 20 minutos de dados não se pode afirmar que as melhorias provenientes da solução de ambiguidades inteiras no PPP sejam significativas com relação às soluções reais. Uma particularidade foi a estação POAL que apresentou melhorias no EMQ de 5,9 % na resultante, após a solução das ambiguidades. De qualquer forma, esses valores são pouco significativos comparados com os obtidos nos outros experimentos e tomando-os por base não se pode afirmar que foram resultados satisfatórios.

Quanto aos resultados apresentados pelas estações PPTE, RECF, BRAZ e POAL, no caso dos experimentos com 25 minutos de dados, melhorias consideráveis foram obtidas em algumas estações como PPTE e POAL após a aplicação do método de solução das ambiguidades. Isso

Tabela 3. EMQ calculado para as soluções reais e inteiras em comparação com as fornecidas pela solução SIR09P01 para 40, 50 e 60 minutos de dados.

EQM	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				% Fix	%melhoria			
	e	n	u	3D	e	n	u	3D		e	n	u	3D
40 min													
PPTE	81,2	28,2	108,3	138,3	57,4	23	96,7	114,8	89,5	29,4	18,2	10,7	17
RECF	106,3	31,2	108,2	154,9	107,2	28,5	108,6	155,2	87,3	-0,8	8,5	-0,4	-0,2
BRAZ	59,5	21	89,5	109,5	26,4	16,7	70,4	77	81,4	55,7	20,8	21,3	29,7
POAL	51,3	23,9	82,4	100	24	15,6	63,1	69,3	91,8	53,2	34,5	23,4	30,7
NAUS	113,1	53,7	104,1	162,8	111,2	53,3	103,9	161,2	20,3	1,7	0,7	0,2	1
50 min													
PPTE	60,7	21	85,8	107,1	40	14,7	83,2	93,5	90,4	34,1	29,8	3	12,7
RECF	84,7	26	83,2	121,6	69,9	20	68,1	99,6	88,3	17,5	23	18,2	18,1
BRAZ	49,9	16,4	68,3	86,2	27,3	11,4	43,2	52,3	80,8	45,3	30,7	36,8	39,3
POAL	37,9	16,9	54,5	68,5	15,7	9,5	35,8	40,3	92,2	58,5	43,7	34,3	41,2
NAUS	83,2	30,7	83,4	121,7	82,3	31,4	81,7	120,2	22,5	1,1	-2,3	2	1,3
60 min													
PPTE	44,9	15,2	54,5	72,2	16,7	8,2	38	42,3	92	62,9	46,3	30,2	41,5
RECF	60,1	19,5	65,1	90,7	35	12,2	58,4	69,1	89,1	41,7	37,3	10,3	23,8
BRAZ	39,1	13,4	48,4	63,7	18,5	8,8	31	37,2	81,5	52,7	34	35,9	41,6
POAL	30,2	14,5	43,8	55,1	10,4	7,9	23,1	26,5	92,1	65,6	45,4	47,3	51,9
NAUS	75	23,4	70,4	105,6	71,9	22,7	68,8	102	28,2	4,2	3,2	2,3	3,3

representa um indicativo que a metodologia aplicada passou a proporcionar resultados positivos, os quais podem ser considerados satisfatórios com esse intervalo de tempo.

Nos experimentos com 30 minutos de dados o EMQ das soluções melhorou de forma significativa, como por exemplo, POAL com 39,8% de melhoria na resultante 3D após as ambiguidades terem sido solucionadas.

Os experimentos com 40, 50 e 60 minutos de dados confirmam os resultados obtidos nos experimentos com 30 minutos de dados, apresentando porcentagens de melhorias das soluções inteiras em relação às soluções reais de 40 a 60% em muitos casos.

Dentre as cinco estações de teste, observou-se que a estação POAL teve um excelente desempenho no contexto desta pesquisa. Esta, por sua vez, apresentou maior porcentagem de melhoria das soluções inteiras em relação às soluções de ambiguidades reais. Nesta estação também se obteve valores de EMQ menores nas soluções reais. Em consequência, considerando as melhorias obtidas por esta estação após a solução das ambiguidades, os valores das soluções inteiras também foram menores em comparação as outras estações.

Com relação à estação NAUS, não foram obtidos resultados satisfatórios com dados de 20 a 60 minutos. Considerando que a distância média entre esta estação e as estações da rede suporte foi de 655 km, é provável ser essa a causa da não solução de ambiguidades a partir da metodologia utilizada. Outra especulação pode estar vinculada com as condições atmosféricas adversas da região. Contudo, estudos mais aprofundados precisam ser realizados nesse sentido.

De uma forma geral, os experimentos realizados com os arquivos de até uma hora de dados revelaram que o método utilizado é recomendado, para uma estação localizada em até 360 km da rede suporte, com pelo menos 30 minutos de dados. Essa distância é baseada no maior valor para a média da distância encontrada nos experimentos que apresentaram resultados satisfatórios. Isso não quer dizer que as estações localizadas com distância maior que 360 km da rede representem a obtenção de resultados negativos, já

que não se pode afirmar que a distância foi a causa do desempenho ruim do método na estação NAUS.

Com base nos experimentos realizados e resultados obtidos no trabalho, pode-se verificar que, em geral, as soluções de ambiguidades inteiras apresentaram melhores resultados do que as de ambiguidades reais, com destaque para períodos de ocupações de tempo menores. Com este trabalho se conclui que a solução de ambiguidades no PPP se torna possível de ser realizada, com dados de até uma hora, para trabalhos que exigem acurácia centimétrica. Algo importante a deixar claro é que isso depende de como o tratamento dos erros das observáveis é realizado e de algumas limitações apresentadas e que necessitam de mais investigações, como por exemplo, à distância da estação do usuário até a rede suporte.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a CAPES, pelo apoio em forma de bolsa de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da UFPE, e a FACEPE, pelo auxílio fornecido para o desenvolvimento da pesquisa. A FAPESP, processo 2006/04008-2, também contribuiu de forma importante com essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNESE. Bernese GPS Software (2007). User manual of the Bernese GPS Software Version 5.0. Edited by. Rolf Dach, Urs Hugentobler., Pierre Fridez, Michael Meindl. January 2007. AIUB Astronomical Institute, University of Bern. Disponível em: <www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU50.pdf>. Acesso em: 26/05/2010.

BLEWITT, G. (1989). **Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km.** J Geophys Res, 94(B8):10187–10203.

BLEWITT, G. (2008). **Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap,** J. Geophys. Res., 113, B12410, doi:10.1029/2008JB005736.

COLLINS, P; BISNATH, S; LAHAYE, F; HÉROUX, P. (2010). **Undifferenced GPS**

- ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing.** *Navigation* 57(2): 123-135.
- DE JONGE, P; TIBERIUS, C. C. J. M. **The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects.** T.U. Delft - internal report, Delft, 1996.
- GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M; SHI, C.; LIU, J. (2007). **Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations.** *Journal of Geodesy*. DOI:10.1007/s00190-007-0187-4.
- GENG, J.; TEFERLE, F.N.; SHI, C.; MENG, X.; DODSON, A.H.; LIU, J. (2009). **Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data.** *GPS solute*, v.13, n.4, p.263-270, 2009. DOI:10.1007/s10291-009-0119-2.
- GREGORIUS, T. (1996). **GIPSY-OASIS II How it works...** Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne. October, 1996.
- IGS. **IGS Products (2009).** Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: 20/10/2009.
- LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J. P.; BROCA, P.; CERRI, L. (2009). **Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination.** *Navigation* 56(2): 135 – 149.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações.** 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.
- RENKA, R. (1997). Algorithm 772: STRIPACK: **Delaunay triangulation and Voronoi diagram on the surface of a sphere.** *Transactions on Mathematical Software*, 23(3): 416– 434. ACM 0098-3500/97/0900–0416.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications.** 2nd. ed., Berlin, New-York: Walter de Gruyter, 2003.
- SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. (2005). **Validação da solução da ambiguidade GPS: Fundamentos, Implementação e Resultados. Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (IV) – UFPR- Curitiba PR.**
- TEUNISSEN, P. J. G. **GPS carrier phase ambiguity fixing concepts.** In *GPS for Geodesy*. 2ed. Springer Verlag, 1998. p.319-388.