

Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Aspectos da Otimização e Processamento de Redes GPS

Márcia Cristina Marini, João Francisco Galera Monico
Pesquisas em Geociências, 30 (2): 51-60, jan./abr., 2004.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19592>

Publicado por

Instituto de Geociências



Portal de Periódicos **UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - jan./abr., 2004.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Aspectos da Otimização e Processamento de Redes GPS

MÁRCIA CRISTINA MARINI & JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Caixa Postal 468
Presidente Prudente, São Paulo. CEP 19.060-900. marini@prudente.unesp.br

(Recebido em 01/03. Aceito para publicação em 02/04)

Abstract - This paper deals with some aspects which should be taken into account for the densification of geodetic network using GPS technology, specially in the concern of Earth body tide modes, ambiguity resolution and the variance propagation of the network constrains. Based on trials accomplished for a GPS network, some aspects of GPS network optimization and processing are presented. In network optimization, applied to GPS networks, are presented the Zero Order, First Order and Second Order Problems, showing the needs of planning the GPS observations and processing in such a way that one can reach the required accuracy with high reliability and low costs. In the tests to evaluate the need for applying Earth body tide model, it was verified that it is necessary for baselines longer than 200 km for the majority of network application. It was noticed that the ambiguity solution should always be analyzed before accepting a fixed solution as the best, since the presented results demonstrated that some fixed ambiguities are inconsistent. In the processing trials with fixed constrains (without taken into account the precision) or fiducial constrains (with associated precision), it was noticed that the former provided better dispersion values for the new points, however, the last one provided more reliable values, since the new points have associated with themselves the uncertainty of the datum points.

Keywords - GPS network processing GPS, optimization, geodetic network densification.

INTRODUÇÃO

A densificação do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é uma das muitas aplicações do GPS. Considerando que o SGB deve atender a uma grande gama de aplicações, ele deve ser o mais preciso e confiável possível. Neste sentido, um sistema geodésico sempre deve ser materializado por redes geodésicas, que consistem na realização do referencial geodésico de uma região, cujos vértices guardam entre si alguma relação de precisão e apresentam alta confiabilidade.

O objetivo deste trabalho é apresentar a realização da Rede GPS ITESP e discutir alguns aspectos da realização de redes GPS que contribuem grandemente para sua qualidade. São eles:

- otimização de redes GPS;
- influência dos modelos para a correção das marés terrestres na solução das linhas de base;
- escolha da solução no que se refere à ambigüidade;
- influência da incerteza das coordenadas dos vértices de junção na precisão da nova rede, visto que a densificação do apoio geodésico deve, preferencialmente, partir de uma rede de referência com ordem de precisão superior.

As respostas a essas questões foram baseadas na realização da Rede GPS ITESP, que densificou a malha de vértices GPS da Rede GPS São Paulo e do SGB (Marini, 2002).

Visando alcançar os objetivos propostos, apresenta-se os conceitos de redes GPS, otimização de redes GPS, injunções no processamento de redes. São apresentadas também as etapas da realização da Rede GPS ITESP, além das análises realizadas sobre os dados com enfoque em cada um dos temas apresentados.

REDES GPS

O conjunto de todas as observações feitas simultaneamente durante uma cobertura de satélites no curso de um projeto GPS é chamado de *sessão*. Uma rede geodésica GPS é o conjunto de estações que foram ocupadas em diferentes sessões, que têm entre si pelo menos uma estação comum.

No processamento das observações GPS, são fornecidas as coordenadas de cada vértice, ou as diferenças de coordenadas. Internamente, no programa de processamento, as observações, que são redundantes, sofrem um ajustamento. Esse procedimento caracteriza o transporte simples de coordenadas de um vértice com GPS. Quando se trata de uma

rede, para garantir confiabilidade, cada vértice tem suas coordenadas, ou diferenças de coordenadas, determinadas em pelo menos duas sessões independentes. Assim, com a redundância de resultados para um mesmo vértice, as coordenadas, ou diferenças de coordenadas, fornecidas por cada sessão de rastreamento passam a ser consideradas observações a serem ajustadas e a MVC (Matriz Variância e Covariância) dessas observações é formada por submatrizes de covariância de cada sessão de observação.

Num ajustamento de rede, faz-se a combinação de soluções de várias sessões numa solução rigorosa de toda a rede. O *software* de processamento deve ser adequado para esse propósito, pois deve considerar a correlação entre todas as observações da rede, de modo que o resultado obtido apresente uma dispersão formal compatível com a dispersão real das estações. Em geral, nesse aspecto os *softwares* científicos são mais adequados do que os comerciais, pois estes últimos, na sua grande maioria, não consideram a covariância entre as estações, ou seja, a matriz Peso para o ajustamento das sessões é bloco diagonal.

OTIMIZAÇÃO DE REDES GPS

O termo otimização (ou pré-análise) de redes geodésicas envolve estudos de procedimentos adotados na etapa de planejamento com a finalidade de alcançar a acurácia requerida para o projeto com a maior confiabilidade possível, com o mínimo esforço e o menor custo. Schaffrin (1985) representa essa idéia com a seguinte expressão:

$$(Precisão) + (Confiabilidade) + (Custos)-I = \text{máximo}$$

O termo "precisão" poderia ser substituído por "acurácia", uma vez que se busca determinar a exata posição do vértice.

Isto significa dizer que uma rede deve ser planejada de modo que a acurácia estipulada para os elementos da rede possa ser alcançada; que seja tão sensível aos testes estatísticos de modo a permitir a detecção de erros grosseiros nas medidas tão pequenos quanto possível e, finalmente, que a materialização dos pontos e as medidas observadas satisfaçam ao critério de custo mínimo (Kuang, 1996).

Lembrando a classificação dos problemas da otimização, desenvolvida por Grafarend (1974) para redes clássicas (poligonação, triangulação ou trilateração), pode-se tecer algumas considerações, quando se trata de redes GPS:

1. no problema de Ordem Zero (definição do referencial), o sistema de referência é solucionado pelas efemérides dos satélites, que definem um referencial geocêntrico, ou pelos vértices fiduciais da rede;
2. no problema de Primeira Ordem (busca a melhor geometria para a rede), a determinação da geometria da rede deve considerar que a geometria das estações terrestres e a geometria dos satélites observados resultem numa geometria ótima, que compreenda toda a rede. Deve também garantir o princípio básico do ajustamento, ou seja, que o número de observações seja maior que número de incógnitas, e quanto maior a repetibilidade das observações maior a confiabilidade. Aspectos logísticos também devem ser considerados;
3. o problema de Segunda Ordem procura a melhor distribuição dos pesos das observações. No caso de redes GPS o problema vai mais além. No que se refere às observações, a precisão das distâncias observadas é crucial para alcançar a acurácia final dos vértices. Como a redundância das observações é grande, os erros aleatórios têm um efeito pequeno sobre as observações GPS; entretanto, o controle e detecção de erros sistemáticos como resolução da ambigüidade, erros do relógio, ionosfera, troposfera, erros da órbita, etc., é imprescindível para atingir a acurácia desejada na rede. Assim, o Problema de Segunda Ordem para redes GPS trata, principalmente, do modelamento dos erros (*bias*) nas observações.

Na bibliografia consultada (Dominici *et al.*, 1995, Even-Tzur & Papo, 1996, Kuang, 1991, 1996, Snay, 1986), não se encontram pesquisas desenvolvidas no sentido de selecionar a melhor geometria dos satélites conjuntamente com as estações terrestres. A utilização do fator DOP (*Dilution of Precision*) convencional na especificação da geometria não parece ser o melhor parâmetro, visto que esse fator representa a relação dos satélites "visíveis" com apenas uma estação terrestre.

A respeito do comprometimento da posição relativa das estações terrestres na precisão final da rede, Even-Tzur *et al.* (1996) publicaram um estudo, que compara a matriz *design* de uma rede GPS à matriz *design* gerada por uma rede de nivelamento. Segundo seus estudos, assim como numa rede de nivelamento, a posição relativa dos vértices da rede GPS, ou seja, a geometria do polígono por eles for-

mado, não interfere na sua precisão final, mas sim o comprimento das linhas de base, que deve ser o menor e mais homogêneo possível.

Uma configuração de linhas de base escolhidas de forma adequada pode resultar em ganho de precisão e confiabilidade e grande economia no campo. Sobre esse aspecto, Snay (1986) fez um estudo de estratégias de rastreamento para redes com 3 e 4 receptores e propôs uma metodologia que garanta a redundância de ocupação a baixo custo.

Devido a questões de logística, como número e tipo de equipamentos disponíveis, distância entre as estações, restrição de horário de rastreamento ao expediente normal de trabalho, etc, muitas vezes tem-se que adequar o *design* ideal ao *design* possível para atingir a acurácia e confiabilidade desejadas. Diante desta situação, resta ao planejador decidir com uma certa liberdade sobre o número das linhas de base quase-independentes, ou seja, aquelas que ligam duas ou mais sessões, e a ordem de rastreamento das mesmas. Por exemplo, se há dez estações a serem determinadas na rede e apenas três receptores disponíveis para o rastreamento, será necessário um mínimo de 7 sessões para garantir que todos os vértices sejam ocupados pelo menos duas vezes, havendo pelo menos um vértice comum entre duas ou mais sessões. O planejador decide a ordem de rastreamento em função da localização das estações, do tempo de deslocamento e do horário de trabalho, de forma a garantir linhas de base tão curtas e homogêneas quanto possível.

INJUNÇÕES

No ajustamento de observações, a estimação dos parâmetros só é possível pela álgebra de Cayley se a matriz A for positiva definida, permitindo a inversão da matriz N . Para que N seja inversível, a deficiência de característica da matriz A é eliminada através da inclusão de injunções, que no caso de redes geodésicas são vértices cujas coordenadas são conhecidas, preferencialmente com ordem de precisão superior ao levantamento em questão. Quando as coordenadas das estações de injunção são mantidas fixas (invariantes) no ajustamento, elas são chamadas *injunções absolutas* ou *estações fixas*; quando se pode associar a elas a informação da precisão, são as *injunções relativas* ou *estações fiduciais*.

A introdução da informação referente às injunções é feita na forma de *pseudo-observações*, acrescentando à matriz A as linhas correspondentes

aos coeficientes das injunções (0 ou 1). As injunções, sejam elas fixas ou fiduciais, são definidas como sub-matriz na matriz peso. Os resíduos das injunções são a própria correção aos parâmetros aproximados. Assim, no contexto do ajustamento das observações, sendo A a matriz *design*, P a matriz peso, Σ_{Lb} a MVC das observações, Σ_{X_2} a MVC das coordenadas de injunção, V o vetor dos resíduos e X o vetor de correção aos parâmetros aproximados, tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial X_1} \\ \frac{\partial F}{\partial X_2} \end{bmatrix}; P = \begin{bmatrix} \sigma_0^2 \Sigma_{Lb}^{-1} & 0 \\ 0 & \Sigma_{X_2}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}; V = \begin{bmatrix} V_1 \\ X \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde o índice 1 refere-se aos novos pontos sendo determinados e o índice 2 refere-se aos pontos de injunção. No caso de se introduzir injunções fixas, adota-se pesos exageradamente grandes para as respectivas coordenadas ($P_2 \rightarrow \infty$).

Quando as injunções são inseridas no ajustamento, cuidado especial deve ser tomado na etapa de validação do ajustamento. Se, após a verificação e eliminação de erros grosseiros nas observações, o fator de variância *a posteriori* continua incompatível com o fator de variância *a priori* e a magnitude dos resíduos é razoavelmente pequena, quando comparada com a precisão atribuída às observações, pode-se supor que a precisão *a priori* dada às observações não está correta e que a MVC das observações (Σ_{Lb}) deve ser reconstruída. Na prática, isso significa escalar Σ_{Lb} pelo fator de variância *a posteriori*, isto é (Kuang, 1996):

$$\tilde{\Sigma}_{Lb} = \hat{\sigma}_0^2 \Sigma_{Lb} \quad (2)$$

o que equivale a dividir a matriz peso por $\hat{\sigma}_0^2$.

Como a matriz peso é formada em parte pela MVC das observações "reais", que, no caso em questão são os vetores GPS, e em parte pelas MVC das *pseudo-observações* (coordenadas das estações fiduciais), a equação (2) deve ser aplicada somente à sub-matriz referente às observações propriamente ditas, ou seja, a submatriz P_1 da equação (1). Caso contrário, toda a MVC dos parâmetros será afetada de forma inadequada.

No processo de ajustamento das observações, quando as injunções são fixas, não são transferidas para os parâmetros incógnitos as incertezas dos parâmetros aos quais eles estão ligados.



Figura 1 - Vértices da Rede GPS ITESP e da Rede GPS do Estado de São Paulo.

Em consequência, a solução obtida, apesar de ser mais atraente, por apresentar valores numéricos de dispersão menores, não representa a realidade, pois contraria a lei de propagação das covariâncias. Já as estações fiduciais transferem suas incertezas aos parâmetros incógnitos e, por isso, apresentam valores de dispersão maiores, porém mais realísticos.

REALIZAÇÃO DA REDE GPS ITESP

Planejamento e materialização dos vértices

O planejamento da Rede ITESP foi efetuado de forma a considerar os conceitos de otimização de redes geodésicas. Assim, procurou-se estabelecer sessões cujas linhas de base fossem menores possíveis, considerando, além da simultaneidade, o tempo de deslocamento entre elas, o horário de expediente e o horário de rastreamento.

A escolha das cidades onde seriam implantados os vértices levou em consideração a existência de 24 vértices da Rede São Paulo e os projetos a médio prazo do ITESP. Desta análise concluiu-se sobre a necessidade de implantar 27 estações em todo o Estado. A figura 1 mostra a distribuição dos vértices da Rede GPS São Paulo e da Rede GPS ITESP.

Os locais preferenciais para a implantação dos marcos geodésicos foram instituições públicas ou de ensino, por se tratar de um local seguro, onde a integridade física do marco fosse preservada, de fácil acesso, com a visibilidade do céu desobstruída acima dos 15° de elevação, solo estável e vizinhança desfavorável ao multicaminho dos sinais.

Os vértices foram materializados com marco de concreto pré-fabricado, em formato cilíndrico, com centragem forçada.

Como todas as linhas de base ultrapassam a distância de 20 km, os receptores utilizados na campanha de observação são receptores capazes de coletar as duas frequências dos sinais do GPS, L_1 e L_2 , permitindo a combinação L_0 , para minimizar os efeitos da ionosfera. São dois receptores Javad, hoje Topcon, modelo Legacy, da Fundação ITESP, um receptor Ashtech ZXII da FCT-Unesp, e receptores da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo).

Dentre as estações da RBMC, foram selecionadas para fazer parte da Rede ITESP as mais próximas do Estado de São Paulo, que são Presidente Prudente - UEPP, Viçosa - VICO, Curitiba - PARA, e Rio de Janeiro - RIOD. Por estarem disponíveis 24 horas por dia, não influenciaram na determinação do horário de rastreamento.

Tabela 1 - Especificações técnicas para a coleta de dados.

Especificação	Marcos principais, RBMC e Rede São Paulo	Marcos de Azimute
Tempo mínimo de rastreo	4 horas	2 horas
Taxa de coleta das obs.	15 segundos	15 segundos
Máscara de elevação	15°	15°
Orientação da antena	Norte	Norte
Observáveis mínimas	L1 e L2, C1 e P2	L1 e C1
Receptores	Ashtech ZXII, Trimble 4000SSI*, Ashtech Z-FX**, JAVAD Legacy	Trimble 4600 Trimble Pro-XL

(*)UEPP, PARA, VICO

(*)RIOD

Coleta de dados

A ordem e horário da ocupação das estações levaram em consideração a extensão das linhas de base. Assim, foram selecionadas para fazer parte de uma mesma sessão as estações mais próximas entre si, garantindo linhas de base menores, logo com menor ruído, proporcionando vetores mais precisos, e menor tempo de deslocamento, portanto com menor custo. Além desses fatores, para estabelecer o horário do início das observações houve um estudo prévio, por meio de aplicativos que permitem planejamento de missão, verificando qual o horário em que haveria maior número de satélites disponíveis, dentro das limitações do horário de expediente de trabalho dos técnicos envolvidos, com certa flexibilidade.

O tempo mínimo de rastreo estabelecido foi baseado nas especificações dadas pelo IBGE para levantamentos com GPS (IBGE, 1998), ou seja, 4 horas para linhas de base maiores que 100 km. Como deve haver simultaneidade entre as observações, e para garantir que todas as linhas de base atendam ao tempo mínimo estabelecido, até mesmo as linhas de base com menor distância foram rastreadas com 4 horas de ocupação.

A etapa de coleta de dados exigiu da equipe total sintonia e máxima atenção e cuidados. Para minimizar alguns dos erros do GPS, alguns cuidados na fase de coleta de dados foram tomados:

- pelo menos uma reocupação das estações, em períodos diferentes, permitindo a detecção de erros na altura da antena no ajustamento das sessões;
- orientação da antena para o norte, possibilitando eventual correção posterior do centro de fase da antena;
- rastreo simultâneo de, no mínimo, quatro horas, de modo que a superabundância de observações permita a exclusão de observações com ruídos, sem prejuízo da precisão;
- seleção da máscara de elevação de 15°, reduzindo os efeitos da troposfera sobre os sinais GPS, com fator de escala calculado para cada estação no processamento.

A campanha de observação dos vértices da Rede ITESP envolveu 29 sessões de rastreo, distribuídas ao longo de 5 meses: de outubro de 2001 a fevereiro de 2002.

Pré-processamento dos dados

No processamento dos dados da Rede ITESP utilizou-se o Sistema GAS (GPS Analysis Software), desenvolvido pelo IESSG (Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy), da Universidade de Nottingham, Inglaterra, concebido para processar redes GPS. Por se tratar de um software científico, cada etapa pode ser controlada pelo usuário, através de um processo interativo.

As coordenadas dos satélites foram obtidas a partir de efemérides precisas do IGS, as órbitas finais, denominadas IGS, que apresentam acurácia melhor que 5 cm e 1 nanossegundo. A integração da rede ao SGB, após a coleta dos dados, passa pelas seguintes etapas: o pré-processamento dos dados, o processamento de cada sessão individual e o ajustamento final, incluindo os resultados do processamento de todas as sessões.

O pré-processamento dos dados consiste em detectar perdas de ciclos e erros grosseiros nas observações. É a tarefa mais trabalhosa a ser realizada em todo o processo. Nesta etapa, cada linha de base independente deve ser processada isoladamente. Através da análise dos resíduos da tripla diferença das observáveis L0 (Iono Free) e L3 (Wide Lane) (Seeber, 1993), tenta-se determinar todas as perdas de ciclo existentes. Em alguns casos, é necessário realizar a análise manualmente, por meio da inspeção dos resíduos. As observações que apresentarem os maiores resíduos na tripla diferença (acima 0.3 ciclos) são eliminadas e nova análise é feita. Das 29

sessões de observação foram geradas 75 linhas de base independentes, que foram processadas individualmente nessa primeira fase do processamento.

Para se considerar uma boa solução, tanto no pré-processamento das linhas de base, quanto no processamento da sessão, o valor de $\hat{\sigma}_0$ deve ser inferior a 10mm. Esse número está relacionado ao controle de qualidade para um nível de confiança igual a 95%.

Processamento dos dados

O processamento dos dados de cada sessão, onde estão incluídas todas as linhas de base independentes da sessão, foi realizado no modo não-fiducial, ou livre, ou seja, sem fixar as coordenadas de nenhuma estação. Desta forma, eventuais problemas nos dados das estações fiduciais podem ser evidenciados na análise do relatório dos resíduos. Após o processamento, assim como no pré-processamento, o software emite um relatório de resíduos, porém agora com a influência dos dados de todas as estações da sessão. Uma análise dos resíduos permite verificar se restam *outliers* a serem eliminados. Esse fato é devido à influência das outras estações sobre a linha de base afetada. Quando isso ocorreu, a observação com erro foi eliminada e o processamento novamente efetuado.

Após a certificação, por meio da análise dos resíduos, de que as observações estão isentas de erros grosseiros, a observável principal passa a ser a dupla diferença da combinação L_0 . Também são introduzidas as correções do centro de fase das antenas utilizadas na sessão de rastreamento, a solução das ambigüidades e o modelo de correção para os efeitos das marés terrestres. Assim, foram processadas todas as sessões da rede individualmente.

Nessa fase, alguns testes foram realizados, concernentes à aplicação do modelo de correção para os efeitos das marés terrestres e à solução das ambigüidades.

Marés terrestres

Marés terrestres é a denominação dada a variações resultantes de fenômenos geofísicos, em geral gravitacionais, envolvendo a Terra, o Sol e a Lua, ocorridos durante o período de coleta das observações, podendo afetar as coordenadas das estações envolvidas no levantamento. Próximo ao equador, o deslocamento pode chegar a 40 cm em 6 horas. É provável que o efeito das marés terrestres seja o mesmo para estações próximas, cancelando-

se. Para linhas de base longas, esse efeito deve ser tratado (Monico, 2000). As efemérides do Sol e da Lua são introduzidas no processamento, permitindo o modelamento desse fenômeno.

Geralmente, em processamentos de dados GPS, não se considera os efeitos das marés terrestres sobre as coordenadas dos vértices determinados. De fato, sabe-se que esses efeitos são pequenos, entretanto, no processamento das sessões da Rede GPS ITESP este estudo foi realizado com o intuito de quantificá-los e discutir a consequência de desprezar esses efeitos em processamentos de linhas de base no cotidiano.

Para analisar os efeitos das marés terrestres sobre as linhas de base, realizou-se o processamento das sessões da rede nas duas situações: com e sem a referida correção. A discrepância média para os vetores é de 0,8 mm na componente ΔX , e 0,2 mm em ΔY e ΔZ . A resultante média é de 3,7 mm, e pode ser observada na figura 2.

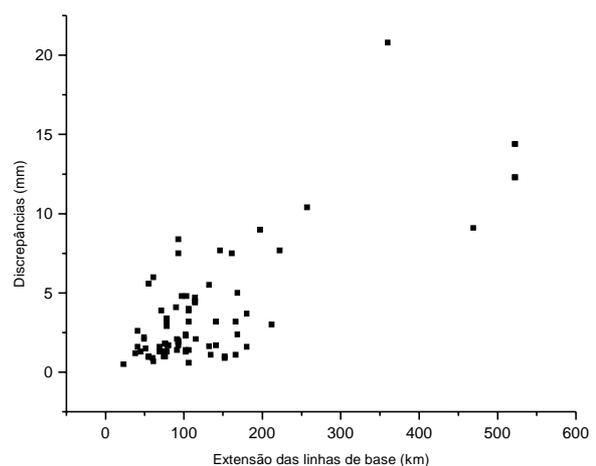


Figura 2- Discrepâncias dos vetores de linha de base entre a solução com o modelo de marés terrestres e sem o modelo (segundo Marini, 2002).

Analisando os resultados obtidos nos dois processamentos, verifica-se que a discrepância entre as soluções raramente ultrapassa a casa do centímetro para linhas de base de até 200 km. Isso significa que para redes geodésicas que requerem precisão centimétrica e que tenham linhas de base de até 200 km o modelo de marés terrestres pode ser ignorado.

A solução que aplica o modelo de correção dos efeitos das marés terrestres foi adotada para todas as linhas de base da Rede GPS ITESP.

Ambigüidade

Os receptores medem a parte fracional da fase da onda portadora, e iniciam a contagem dos ciclos que entram no receptor a partir de então. O número de ciclos inteiros entre o satélite e o receptor da primeira época de observação é denominado ambigüidade, que é um parâmetro determinado no ajustamento, juntamente com os demais parâmetros. A solução da ambigüidade não é um problema trivial e existem várias técnicas de solução. Devido aos satélites GPS estarem em órbitas de altitude muito elevada, suas posições com respeito aos receptores mudam muito lentamente, o que acarreta que o valor da ambigüidade real seja de precisão ruim, levando a uma baixa precisão para a linha de base, quando se trata de curtos períodos de observação. Ao fixar a ambigüidade através da injunção de um valor inteiro de ciclos, a fase da portadora de alta precisão passa a atuar como se fosse pseudodistância de alta precisão. Assim, fixar a ambigüidade é um modo de evitar longos períodos de observação, que de outra forma seriam necessários se as ambigüidades fossem tratadas como valor real (Teunissen, 1998).

Um teste estatístico que permite avaliar a qualidade da solução é o Teste F, que compara o aumento em resíduos (V^{TPV}) para a melhor solução da ambigüidade com o aumento para a segunda melhor solução. O Teste F checa essa razão para verificar se a melhor solução é significativamente maior que a segunda melhor solução, dando confiança de que as ambigüidades corretas foram de fato resolvidas. O valor que expressa essa idéia é chamado *ratio* (Stewart *et al*, 1994). Assim, quanto maior o valor do *ratio*, melhor a solução.

O que se pôde perceber durante a análise do processamento dos dados é que nem sempre, quando as ambigüidades são solucionadas, a fixação do número inteiro de ciclos é feita com base numa decisão consistente. A tabela 2 apresenta a informação de algumas sessões. Estudo semelhante foi efetuado para todas as sessões da Rede GPS ITESP e orientou a identificação de soluções com problemas. São apresentados os resultados dos ajustamentos de algumas sessões, com o valor da ambigüidade sendo um valor inteiro (*fixa*) e sendo um valor real (*float*) para cada vetor de linha de base. A tabela também apresenta o *ratio* para cada solução. Quando na coluna *ratio* aparece "FAIL", significa que não foi possível fixar a ambigüidade. Analisando essa tabela pode-se associar ao alto valor de $\hat{\sigma}_0$ um valor baixo para o *ratio*, o que traduz uma solução duvidosa da ambigüidade.

Tabela 2 - Comparação dos resultados associados com solução da ambigüidade.

Sessão	Linha de base		Ratio	$\hat{\sigma}_0$ (mm)	
				float	fixed
30_10a	UEPP	EUCL	8,52		
	UEPP	VENC	8,58	6,94	7,49
	EUCL	PARA	FAIL		
01_11	UEPP	ADAM	8,47		
	UEPP	TUPA	6,7	6,67	7,63
05_-11	UEPP	TAQU	9,62		
	UEPP	ARAC	2,32	8,21	12,51
06_11	UEPP	SUDM	1,09		
	UEPP	ANDA	7,11	8,71	9,37
09_11	UEPP	SUDM	5,12		
	UEPP	PANO	8,29		
	UEPP	PAGU	8,27	6,44	6,66
08_01	UEPP	IEPE	6,62		
	RIBP	ARAR	2,14		
	RIBP	VICO	1,25	7,26	14,59
31_01	RIBP	BARR	5,17		
	MIRA	PERU	5,06		
	MIRA	REGI	6,22	7,33	9,93
15_01	MIRA	PARA	1,77		
	SAOP	SORO	2,85		
	SAOP	PIND	3,71	7,96	9,75
	SAOP	RIOD	1,53		

Parte da sessão 08_01 da tabela 02, evidenciada na tabela 3, apresenta uma solução, a princípio, inconsistente para a ambigüidade. Trata-se da linha de base RIBP-VICO. Pode-se observar, por exemplo, que para o satélite PRN 3, a ambigüidade real foi estimada em 2,674 ciclos, com desvio-padrão de 0,011 ciclo; a ambigüidade inteira foi fixada em 2. Observe-se também o PRN 22, onde a ambigüidade real foi estimada em 1,724, com desvio-padrão de 0,016; a ambigüidade inteira foi fixada em 1 ciclo. Ainda mais inconsistente é a solução da ambigüidade para os PRN 26 e 31, com valores de ambigüidade real e desvio-padrão estimados em $1,806 \pm 0,045$ e $1,188 \pm 0,021$, respectivamente, para os quais foram estimadas ambigüidades inteiras iguais a 3 e 0, respectivamente.

Já a sessão 01_11 da tabela 02 ilustra uma solução excelente para fixação da ambigüidade. Parte desta sessão é evidenciada na tabela 4. Observe, por exemplo, que para o PRN 3 a ambigüidade real foi estimada em $-1,996 \pm 0,016$; a correspondente ambigüidade fixada como inteira foi de -2, o que parece razoável. Situação similar ocorre para as demais ambigüidades.

Tabela 3 - Solução da ambigüidade para a linha de base RIBP-VICO, na sessão 08_01

Nº	Linha de base	PRN	Ambigüidade <i>Float</i>	σ_{amb}	Ambigüidade <i>Fixa</i>
15	RIBP-VICO	3	2,674*	0,011	2*
16	RIBP-VICO	6	3,462	0,019	4
17	RIBP-VICO	14	2,887	0,01	3
18	RIBP-VICO	15	2,464	0,009	3
19	RIBP-VICO	17	1,793	0,013	2
20	RIBP-VICO	18	2,341	0,01	2
21	RIBP-VICO	21	0	0	0
22	RIBP-VICO	22	1,724*	0,016	1*
23	RIBP-VICO	23	0	0	0
24	RIBP-VICO	25	-0,147	0,02	0
25	RIBP-VICO	26	1,806**	0,045	3**
26	RIBP-VICO	29	2,799	0,01	3
27	RIBP-VICO	30	3,511	0,02	4
28	RIBP-VICO	31	1,188**	0,021	0**

Tabela 4 - Solução da ambigüidade para a linha de base UEPP-TAQU na sessão 01_11.

Nº	Linha de base	PRN	Ambigüidade <i>Float</i>	σ_{amb}	Ambigüidade <i>Fixa</i>
49	TAQU	3	-1,996	0,016	-2
50	TAQU	5	1,005	0,006	1
51	TAQU	6	4,014	0,005	4
52	TAQU	9	-0,016	0,01	0
53	TAQU	10	2,863	0,009	3
54	TAQU	14	0	0	0
55	TAQU	15	0,053	0,005	0
56	TAQU	17	3,053	0,004	3
57	TAQU	18	0	0	0
58	TAQU	21	0	0	0
59	TAQU	22	-1,864	0,01	-2
60	TAQU	23	0	0	0
61	TAQU	24	0	0	0
62	TAQU	25	-0,972	0,012	-1
63	TAQU	26	0	0	0
64	TAQU	30	-1,983	0,004	-2

Com base nesse tipo de análise, chegou-se à conclusão da seguinte estratégia de processamento: para as sessões com linhas de base cujo *ratio* é menor que um, analisar a consistência da solução e, se for inconsistente, re-processar a sessão sem aquela linha de base. Isso deve garantir uma solução de sessão consistente. A linha de base com problema é processada no modo *float* e inserida na solução da rede. É preferível perder a correlação dessa linha de base com as demais a inserir no ajustamento uma solução inconsistente. A tabela 5 mostra os resultados para as sessões re-processadas.

Nesse novo ajustamento, $\hat{\sigma}_0$ ficou um pouco maior que na solução *float*. Isso já era esperado, pois quando a ambigüidade é fixada, o resíduo gerado nesse processo influencia toda a solução.

Tabela 5 - Comparação entre as soluções de ambigüidade fixa e float para sessões reprocessadas.

Sessão	Linha de base	PRN	<i>Ratio</i>	$\hat{\sigma}_0$ (mm)	
				<i>float</i>	<i>fixed</i>
31_01 (b)	MIRA	PERU	5,71	7,33	8,3
	MIRA	REGI	7,51		
	MIRA	PARA	float		
15_01 (b)	SAOP	SORO	3,11	7,96	9,75
	SAOP	PIND	3,52		
	SAOP	RIOD	float		
08_01 (b)	RIBP	ARAR	6,7	7,26	7,9
	RIBP	BARR	8,97		
	RIBP	VICO	float		

Ajustamento das sessões da rede

Terminada a etapa de processamento das sessões da rede GPS, a próxima fase é o ajustamento das coordenadas, ou diferenças de coordenadas, que o processamento das sessões forneceu. Assim, o que durante o processamento era parâmetro, agora passa a ser observação; os vários resultados obtidos para as linhas de base de todas as sessões são tomados como sendo as observações do ajustamento da rede. A MVC das observações é formada pelas MVC's fornecidas no processamento de cada sessão. Os parâmetros passam a ser as coordenadas ajustadas de cada vértice.

Como o processamento das sessões se deu de forma a não fixar nenhuma coordenada, os resultados foram diferenças de coordenadas entre as linhas de base. No ajustamento da rede é necessário estabelecer o referencial das estações envolvidas, o que é feito por meio das injunções, considerando as estações fixas ou fiduciais, já mencionadas no item 4.

Injunções fixas x fiduciais

Alguns testes foram realizados com os dados da Rede GPS ITESP para analisar as conseqüências do uso de estações fixas ou fiduciais no ajustamento das sessões. Os resultados podem ser verificados nas figuras 1, 2 e 3, extraídas de Marini (2002). A figura 3 apresenta os desvios-padrão em ϕ , λ e h para os dados ajustados com injunções fixas, mostrando desvios-padrão médios da ordem de 9 mm para ϕ , 20 mm para λ , e de 30 mm para h ; a figura 4 apresenta os desvios-padrão em ϕ , λ e h para o ajustamento com injunções fiduciais, onde os desvios médios foram de 16 mm para ϕ , 28 mm para λ , e 34 mm para h . Quando se calcula a resultante dos três desvios-padrão para cada solução, como mostra a figura 5, fica ainda mais clara

a diferença entre as soluções, pois, para a Solução Fixa o desvio resultante médio é de 34 mm e para a Solução Fiducial é de 43 mm.

Conforme já discutido no item 4, embora seja tentador optar pela solução que apresenta desvio-padrão mais baixo, essa não é a solução mais realística, de forma que na solução final da Rede GPS ITESP foram utilizadas injunções fiduciais.

Tendo em vista que um dos objetivos da realização da Rede GPS ITESP é sua integração ao SGB, e que para tanto deve apresentar acurácia das linhas de base inferior a 1 ppm, uma análise das linhas de base mais próximas em toda a rede foi efetuada. A média de acurácia obtida foi de 35 mm, o que representa um resultado bastante satisfatório, cerca de 46% aquém do mínimo exigido.

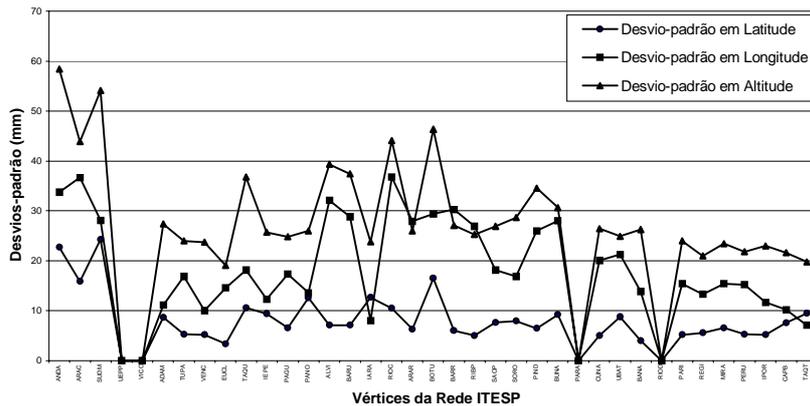


Figura 3 - Desvios-padrão de ϕ , λ e h de uma solução com estações fixas.

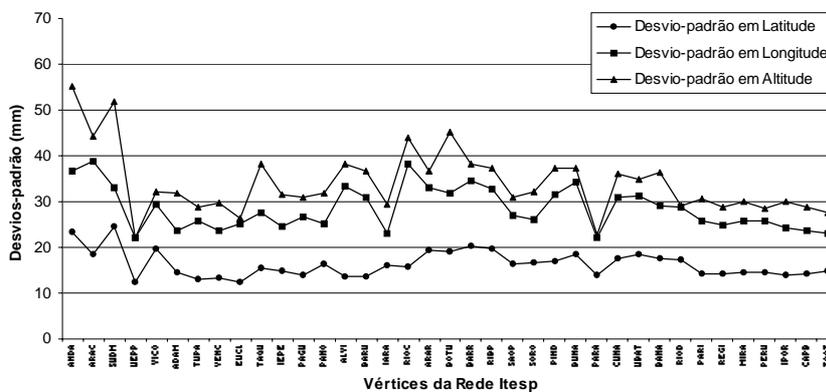


Figura 4 - Desvios-padrão de ϕ , λ e h de uma solução com estações fiduciais.

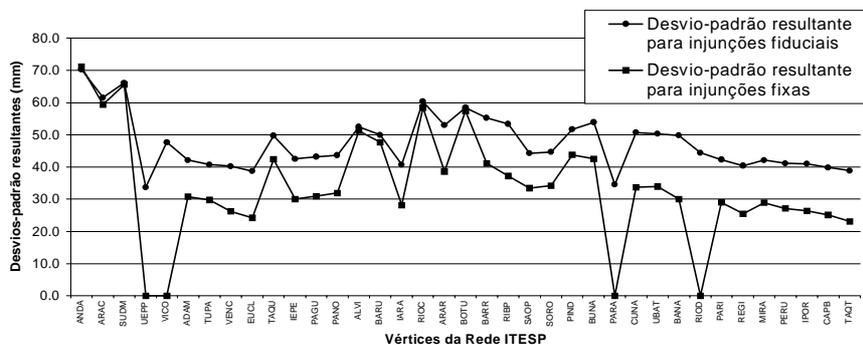


Figura 5 - Desvios-padrão resultantes para solução com estações fixas e fiduciais.

CONCLUSÕES

A otimização de redes GPS é um assunto ainda pouco explorado. Entretanto, é possível estabelecer estratégias de observação e rastreamento que garantam a precisão desejada com alta confiabilidade a custo mínimo.

Quando a rede densificada tiver linhas de base menores que 200 km e, se desejar precisão centimétrica, o efeito das marés terrestres pode ser desprezado.

No que se refere à solução da ambigüidade, pôde-se perceber que nem sempre a escolha pela solução fixa da ambigüidade é a melhor. Quando o *software* permite, recomenda-se a análise detalhada da solução. Entretanto, para o processamento em *softwares* comerciais, em que isso não é possível, uma forma de evitar o problema de solução inconsistente é especificar que o *ratio* seja pelo menos igual ou maior que 3. O cálculo do *ratio* tem variações sutis de um *software* para outro, mas em todos eles é um bom indicador da qualidade da solução da ambigüidade.

Na densificação do apoio geodésico, a utilização de estações fiduciais garante a "linhagem" dos novos vértices, que passam a apresentar valores de dispersão maiores, porém mais realísticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dominici, D.; Stopinni, A.; Unguendoli, M. & Radicioni, F. 1995. Precision and Reliability versus Surplus Measurements in GPS Networks. **Bollettino di Geodesia e Scienze Affini**, 4.
- Even-Tzur, G. & Papo, H. 1996. Optimization of GPS Networks by Linear Programming. **Survey Review**. 33: 262.
- Grafarend, E. W. 1974. Optimization of Geodetic Networks. **Bollettino di Geodesia e Scienze Affini**, 33 (4): 351-406.
- Kuang, S. 1996. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications**. Chelsea, Michigan, Ann Arbor Press, Inc. 368p.
- Kuang, S. 1991. **Optimization and Design of Deformation Schemes**. Technical Report 157. New Brunswick, Canada, University of New Brunswick, 179p.
- Marini, M. C. 2002. **Integração da Rede GPS ITESP ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, 146p. Faculdade de Ciência e Tecnologia, Unesp, Presidente Prudente, São Paulo.
- Monico, J. F. 2000. Posicionamento pelo NAVSTAR/GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. São Paulo, Editora UNESP. 287p.
- Schaffrin, B. 1985. **Aspects of Network Design. Optimization and Design of Geodetic Networks**. Springer-Verlag, 2: 56-82.
- Seeber G. 1993. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. Berlin, New York, Walter de Gruyter, 356 p.
- Snay, R. 1986. Network Design Strategies Applicable to GPS Surveys Using Three or Four Receivers. **Bulletin Géodésique**, 60: 37-50.
- Stewart M. P.; Ffoukes-Jones G. H. & Ochieng W. Y. 1994. **GPS Analysis Software (GAS) version 2.2 User Manual**. Nottingham, IESSG University of Nottingham. 145p.
- Teunissen, P. J. G. 1998. GPS Carrier Phase Ambiguity Fixing Concepts. In: Kleusberg, A. & Teunissen, P. J.G. (eds.) **GPS For Geodesy**. Berlin, Springer-Verlag, p. 319-383.