

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DOS SATÉLITES NA PRECISÃO DAS COORDENADAS GEODÉSICAS OBTIDAS COM O SISTEMA GPS

GUSTAVO CRUZ DA SILVEIRA
PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE

Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
STT - Departamento de Transportes, São Carlos - SP
gustavo@usp.br
seganta@sc.usp.br

RESUMO - A precisão que se pode obter com levantamentos realizados com o uso do Sistema de Posicionamento Global (GPS) depende de uma série de fatores, devido à grande quantidade de fontes de erros. Em geral, estas interferências podem ser modeladas e considerações são feitas de acordo com a contribuição de cada uma destas fontes de erros. Nos primórdios dos sistemas de posicionamento, o planejamento de missões era essencial para encontrar os horários em que haveria satélites suficientes para a determinação da posição. Desde que o GPS foi declarado operacional, essa questão perdeu importância. No entanto, ainda que haja uma grande quantidade de satélites não existem estudos conclusivos sobre a influência que suas posições relativas à antena do receptor causam nos resultados. Esta questão foi investigada usando como ferramenta os indicadores de precisão (DOP) disponíveis. Foi verificada a confiabilidade e a contribuição da geometria nos resultados.

ABSTRACT - The obtaining precision of GPS (Global Positioning System) surveying depends on of many factors, due the several error fonts. In general, these interferences can be modeled and considerations are made as each one contributes. In the beginning of the positioning systems, the mission planning was essential to find the period of the day that would possible to have satellites enough to position determination. Since the GPS was declared operational this issue lost importance. However, even with the great amount of available satellites, there is a lack of conclusive researches about the influence of the satellites positioning regarding the receptor antenna position may cause on the results. This issue was investigated using tools like the available precision indicators (DOP – Dilution of Precision). The reliability and the geometry contribution in the results were verified

1 INTRODUÇÃO

O advento dos sistemas de posicionamento por satélite, o chamado GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) revolucionou a maneira do homem se posicionar e navegar sobre a superfície terrestre, ou próximo a ela.. O sistema que mais investimentos recebeu ao longo dos anos, e que tem seu desenvolvimento mais avançado na atualidade, é o Sistema de Posicionamento Global NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite with Timing and Ranging – Global Positioning System*), mais conhecido apenas pela sigla GPS. Desenvolvido e mantido pelo governo americano, o GPS atende a milhões de usuários em todos os continentes, sendo hoje o mais difundido, e que possui a maior produção e distribuição de receptores.

Nos sistemas de posicionamento anteriores ao GNSS era comum a atividade de se realizar o planejamento das missões devido à pequena quantidade de satélites disponíveis. Dessa forma, os usuários estimavam os horários onde haveria o número máximo

possível de satélites no horizonte da antena receptora para poder atingir o máximo desempenho com o uso do sistema, embora muitas vezes o melhor horário para a coleta era aquele em que, pelos menos, encontravam-se o mínimo de satélites necessários para o posicionamento.

Com o lançamento do GPS esta preocupação foi perdendo importância na medida em que novos satélites eram lançados até a complementação da constelação de satélites. No entanto, a comunidade usuária pôde verificar com o uso que a disposição geométrica também teria influência nos resultados dos levantamentos, não evitando, portanto, que o planejamento das missões continuasse a ser uma prática necessária para se atingir o máximo desempenho do sistema. Assim, foi desenvolvido um indicador de precisão - uma ferramenta que busca permitir uma análise prévia de quais seriam os horários mais indicados para a realização de um levantamento tomando como base não apenas a quantidade de satélites disponíveis, mas também a distribuição geométrica deles numa determinada localização da superfície terrestre.

Essa ferramenta recebe o nome de DOP, sigla em inglês de *Dilution of Precision*, chamado em português de Diluição da Precisão. Esse indicador é comumente subdividido em componentes, gerando novos indicadores, com relação à diluição da precisão vertical, horizontal, temporal, geométrica, entre outras.

Os indicadores de precisão têm a função de apresentar ao usuário uma garantia da qualidade de um futuro levantamento, no entanto, a grande maioria dos usuários verifica que nem sempre esta situação pode ser assegurada pelo simples estudo prévio de tais indicadores. O que se tem verificado é que acontece uma grande confusão, pois em geral os usuários criam a expectativa de que os valores apresentados pelos indicadores sejam capazes de detectar de forma definitiva a possibilidade de o levantamento ter bom resultado, sem considerar os propósitos e as limitações destes indicadores.

Menzori (2005) identificou essa situação através de uma pesquisa com diversos profissionais da área de mensuração, usuários da tecnologia GPS e constatou que a maioria acredita que o sistema apresenta um desempenho menor que o esperado. Isso pode ser representado pelo excesso de confiança no planejamento das missões utilizando os indicadores de precisão ou pela completa falta de planejamento, sem considerar ainda as condições adequadas de coleta, a influência das atividades solares, das condições ionosféricas e troposféricas e das técnicas de processamento.

Outra diferença é comumente encontrada em campo, pois o valor apresentado em tempo real para o usuário pelo receptor, também pode diferir dos valores determinados em escritório. Essa diferença pode ser muito bem compreendida levando-se em consideração o fato de que muitos fatores influenciam no cálculo desse valor, que não são possíveis determinar previamente, como por exemplo, a saúde de um satélite, o estado da atmosfera, e até a obstrução do sinal por alguma construção ou feição que possa inclusive gerar multicaminhamento.

O problema maior é que mesmo os valores apresentados não condizem com a garantia da qualidade dos levantamentos, pois eles não garantem a resolução das duplas diferenças de ambigüidade.

Existem muitos comentários a respeito do desenvolvimento dos novos sistemas GALILEO (europeu), Compass (Chinês) e a renovação dos satélites GLONASS (*GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* - russo), minimizando a preocupação com o número de satélites disponíveis e sua geometria. No entanto, a aquisição de equipamentos capazes de rastrear dados de mais de um sistema certamente será aliada a um custo mais elevado, o que certamente manterá o uso de receptores limitados ao GPS por algum tempo. É importante lembrar que o próprio GPS segue com avanços para modernizar o sistema como os novos sinais L2C e L5. No entanto, em uma demonstração de que mudanças podem ocorrer de forma relativamente drástica, o DoD (USA *Department of Defense*) apontou com a possibilidade de limitar o uso do código P a partir do ano de 2020, conforme publicado por Gakstatter (2008).

2 DILUIÇÃO DA PRECISÃO

O GPS utiliza um conceito denominado *Time-of-Arrival* (TOA) para determinar a posição de um receptor (Kaplan, 1996). Esse conceito envolve a medida de tempo que um sinal transmitido por um emissor (de localização conhecida) leva para alcançar a antena do receptor do usuário. Esse intervalo de tempo, referenciado a um tempo de propagação do sinal, é multiplicado então pela velocidade do sinal, obtendo-se, assim, a distância entre o emissor e a antena do receptor. Medindo-se o tempo de propagação dos sinais emitidos pelos diversos emissores, a antena do receptor pode ter sua posição determinada. Para compreender como esse processo de medição é afetado pela disposição geométrica dos satélites emissores e da antena receptora envolvidos, Langley (1999) apresenta o seguinte exemplo:

Supondo a existência de um sistema de posicionamento que utiliza ondas de rádio, onde seja possível medir distâncias de um receptor a dois emissores terrestres para determinar suas coordenadas horizontais. Considerando que o usuário tem um relógio sincronizado com os emissores e conhece a localização dos emissores e o tempo de propagação das ondas emitidas por eles. O usuário mede o tempo de chegada de cada sinal emitido e calcula o tempo de propagação, o qual determina a distância do usuário a cada emissor. O usuário determina sua posição pela interseção dos anéis de distância determinados pela medida TOA.

No entanto, existe uma margem de incerteza na localização da antena do receptor, e assim, o posicionamento das distâncias circulares poderá ser inexato resultando num erro na posição calculada. Esse erro depende da disposição geométrica dos satélites emissores e a antena do receptor no momento das medições.

Dois geometrias são comparadas. Na Figura 1 (disposição a), nota-se que os emissores estão relativamente distantes, fornecendo uma região relativamente pequena de incerteza na qual a antena do receptor pode ser localizada. O emissor 1 se posiciona na direção ortogonal ao emissor 2, então as coordenadas X e Y da antena do receptor são determinadas com igual precisão.

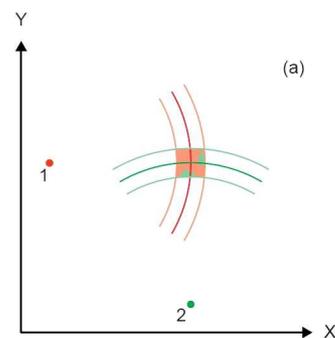


Figura 1 – Geometria com baixo grau de incerteza

Na Figura 2 (disposição b) os emissores estão mais próximos, e o ângulo entre eles é muito menor, resultando numa região de incerteza consideravelmente maior, com a confiança na coordenada Y sendo menor do que a coordenada X.

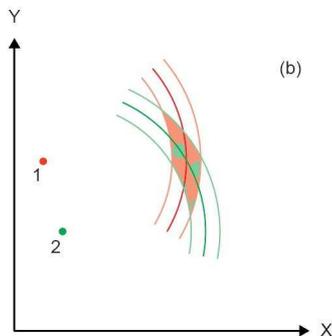


Figura 2 – Geometria com alto grau de incerteza

A gama de arcos ilustrada na cor correspondente ao emissor representa a variação na posição do anel de distância resultando em erros nas medições. A gama de erros é a mesma em ambos os casos. As regiões destacadas representam uma série de localizações que podem ser. A precisão da posição calculada é bem diferente para os dois casos.

Com a mesma variação dos erros medidos, a geometria (b) fornece mais erros no cálculo da localização do usuário do que a representada em (a), como fica evidente comparando as regiões destacadas. Diz-se então que a precisão no caso (b) é degradada em relação ao caso (a). A geometria (b) é dita como tendo a mais ampla diluição da precisão do que a geometria (a). Dessa forma, o conceito de DOP sugere que o erro na posição depende da geometria antena do receptor / emissores.

Apesar de ser fictício, esse exemplo não está distante do caso do sistema de radio-navegação chamado Loran-C (*LOng RAnge Navigation*), embora as medidas sejam realizadas com hipérbolas e não círculos.

Hofmann-Wellenhof et al. (2001) afirmam que os há dois propósitos para o DOP. Primeiramente, os valores são amplamente utilizados na etapa de planejamento das missões de levantamento. Outra utilidade está relacionada ao auxílio na interpretação das linhas de base processadas. A Figura 3 apresenta um gráfico obtido em um software de processamento de dados GPS, informando os valores do PDOP ao longo do dia e a quantidade de satélites disponíveis.

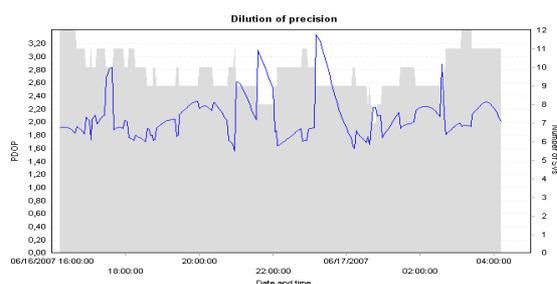


Figura 3 – Variação do PDOP ao longo do dia

2.1 Descrição

A seguir será apresentada uma descrição matemática dos indicadores DOP, segundo Leick (2004):

É comum o uso desses fatores DOP para descrever o efeito da distribuição geométrica dos satélites na precisão da solução de navegação. Os fatores DOP são funções simples dos elementos da diagonal da matriz de covariância dos parâmetros ajustados (segundo a terminologia do ajustamento). No geral:

$$\sigma = \sigma_0 DOP \quad (1)$$

onde σ_0 representa o desvio padrão das pseudodistâncias observadas e σ é o desvio padrão da posição e/ou tempo. Para o cálculo do DOP as observações de pseudodistância são consideradas não correlacionadas e de igual precisão; ou seja, o peso da matriz é:

$$P = \sigma_0^2 I \quad (2)$$

se a lista ordenada de parâmetros é:

$$X^T = [dx_k \quad dy_k \quad dz_k \quad dt_k] \quad (3)$$

então, a matriz design (A), deriva da linearização da equação da pseudodistância em função da localização da estação denominada $x_{k,0}$:

$$A = \begin{bmatrix} e_k^1 & c \\ e_k^2 & c \\ e_k^3 & c \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

A matriz A tem tantos campos quantos foram os satélites observados, os quais tipicamente incluem todos os satélites rastreados. O indicador i representa uma identificação seqüencial para cada satélite não necessariamente igual ao número PRN (*Pseudo-Random-Noise*). O símbolo e_k^i representa o vetor unidade de localização da estação para o satélite i . Os componentes do vetor unidade são os cossenos da direção. O parâmetro ‘erro do relógio’ é freqüentemente representado por $\xi_k = c \cdot dt_k$, fazendo os elementos da segunda coluna unitários. A matriz dos cofatores para o ajustamento da posição e do relógio do receptor é a matriz simétrica:

$$Q_x = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} q_x & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ & q_y & q_{yz} & q_{yt} \\ & & q_z & q_{zt} \\ & & & q_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

No geral, é mais conveniente ver os resultados no sistema de coordenadas geodésicas locais (w), consistindo das coordenadas norte (n), este (e) e altura (u). A matriz cofatora transformada resulta em:

$$Q_w = \begin{bmatrix} q_n & q_{ne} & q_{nu} \\ & q_e & q_{eu} \\ & & q_u \end{bmatrix} \quad (6)$$

Os fatores DOP são função dos elementos da diagonal principal da matriz cofatora. A seguir são apresentados os vários DOPs: VDOP, HDOP, PDOP, TDOP e GDOP. O GDOP é uma medida composta que reflete a geometria na posição e tempo estimados.

$$VDOP = \sqrt{q_h} \quad (7)$$

$$HDOP = \sqrt{q_n + q_e} \quad (8)$$

$$PDOP = \sqrt{q_n + q_e + q_u} = \sqrt{q_x + q_y + q_z} \quad (9)$$

$$TDOP = \sqrt{q_t} \quad (10)$$

$$GDOP = \sqrt{q_n + q_e + q_u + q_t c^2} \quad (11)$$

$$GDOP = \sqrt{(PDOP)^2 + (TDOP)^2}$$

Os DOPs podem ser calculados com antecedência fornecendo-se uma localização aproximada e as órbitas preditas dos satélites. O DOP muda de época para época com a mudança da geometria dos satélites. Como a maioria dos receptores atuais observa todos os satélites disponíveis, os DOPs são usados primariamente para identificar deficiências temporárias na geometria para aplicações do posicionamento estático rápido e do cinemático.

Geometricamente, interpreta-se o PDOP como o inverso do volume de um tetraedro formado pelos 4 satélites e a posição do usuário.

$$PDOP \propto \frac{1}{V} \quad (12)$$

A Figura 4 exemplifica a geometria envolvida. A melhor situação existe quando o volume é maximizado, sendo assim, o PDOP é minimizado. Assim como no exemplo anterior, a melhor geometria refere-se àquela em que os satélites (emissores) estão mais afastados.

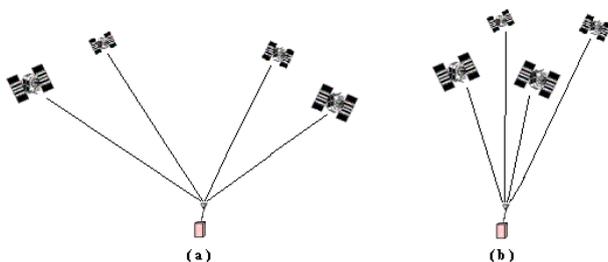


Figura 4 – Geometria dos Satélites. (a) – PDOP Bom. (b) – PDOP Ruim

3 RECURSOS UTILIZADOS

Considerando o montante de dados necessário para a pesquisa e a praticidade oferecida, definiu-se pelo uso

de estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). A recente disponibilidade de novas estações instaladas nos últimos anos permitiu que os comprimentos de linha-base necessários para o estudo fossem adequados

Os dados gerados pelos receptores da rede são automaticamente transformados do formato proprietário desenvolvido pelos seus respectivos fabricantes para o formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), podendo, desta forma, ser importados para qualquer programa de processamento de dados GNSS. O padrão adotado pelo IBGE é a geração de arquivos com duração de 24h com taxa de coleta de 15s.

As estações utilizadas nesta pesquisa seguiram os critérios definidos para os testes de forma a atendê-los. A localização baseou-se na distância a partir de uma estação selecionada para figurar como móvel. Devido à maior concentração de bases na região que compreende a divisa entre os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, a origem foi adotada nesta região. Devido à grande proximidade de duas estações, principalmente por se tratar de duas bases da mesma instituição, e na tentativa de formar a maior linha-base possível a partir de uma delas, optou-se por utilizar dados das seguintes estações, na ordem em que foram utilizadas:

Tabela 1 – Estações da RBMC utilizadas na pesquisa

Estação	Descrição	Início atividades
ONRJ	Observatório Nacional – RJ	31/03/2007
RIOD	Rio de Janeiro - RJ	21/07/2001
CHPI	Cachoeira Paulista – MG	23/03/2005
UBAT	Ubatuba – SP	21/08/1999
VARG	Varginha – MG	08/04/2001
MGIN	Inconfidentes – MG	10/10/2007
POLI	Escola Politécnica da USP	12/12/2006
PPTE	Presidente Prudente – SP	11/12/2005
MSCG	Campo Grande – MS	29/10/2007
CUIB	Cuiabá – MT	18/06/2007
ROGM	Guajará-Mirim – RO	19/10/2007
POVE	Porto Velho – RO	27/03/2007
RIOB	Rio Branco – AC	21/03/2007
CRUZ	Cruzeiro do Sul – AC	22/03/2007

A Figura 6 apresenta a distribuição das estações selecionadas:



Figura 5 – Estações da RBMC selecionadas. Adaptado de IBGE (2008)

Para o processamento e análise dos dados foi utilizado o programa *Leica Geo Office* versão 5.0. Dentro do programa existe um aplicativo chamado *Satellite Availability* usado para planejamento de missões, que é gratuito.

4 PROCEDIMENTOS

As três etapas aqui apresentadas são parte de um estudo maior sobre o comportamento e a influência da geometria dos satélites nas determinações de posição com GPS/GNSS.

4.1 Desenvolvimento da Etapa 1:

A primeira etapa compreende o seguinte estudo: *comparação entre os valores de DOP estimados no planejamento da missão e os reais obtidos no levantamento comparando também com DOP de processamento com efemérides precisas.*

Sabe-se que os programas de planejamento não realizam uma análise conjunta que considerem a localização dos pontos base e móvel para o cálculo do GDOP e, obviamente, no resultado final o cálculo é feito apenas com os satélites coincidentes entre base e móvel utilizados no processamento.

É importante alertar que, para uma melhor visualização das mudanças que ocorrem com os valores de DOP ao longo do tempo, os gráficos são apresentados com diferentes escalas. Nos gráficos de todos os testes a seguir, o GDOP será representado pela linha vermelha e o PDOP pela linha azul. Os dados são do dia 13/03/2008.

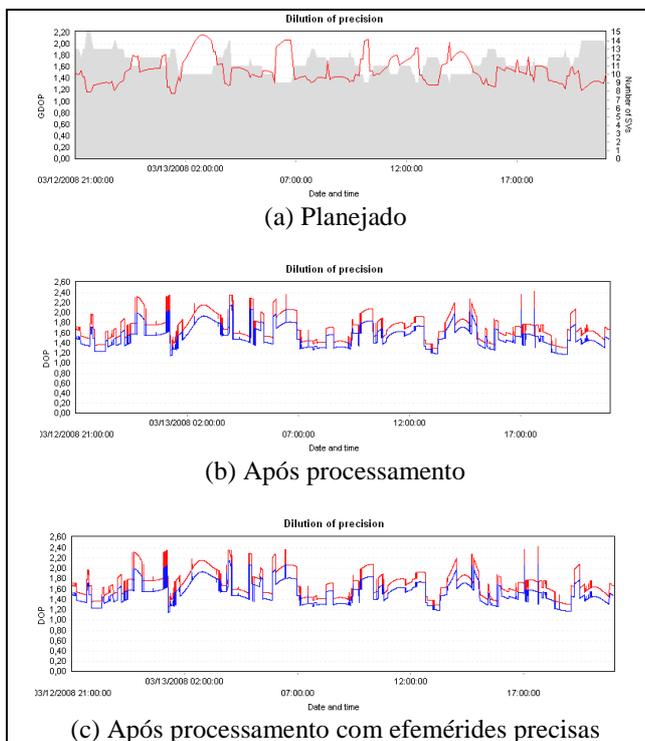


Figura 6 – Gráficos comparativos para a estação POLI.

Os gráficos apresentados na comparação entre os valores de GDOP estimados e os oriundos do levantamento apresentaram uma diferença considerável. No entanto é necessário considerar ainda que, com um ângulo de corte de 0° o programa de planejamento construa os gráficos considerando uma situação ideal. Porém, sabe-se que, apesar de serem bases de monitoramento contínuo, algumas obstruções podem existir e sem contar que numa situação real, mesmo se o receptor já estiver “vendo” o satélite que acabou de entrar no horizonte da antena, pode levar certo tempo para o rastreamento começar a ser devidamente realizado.

Dessa forma, novos gráficos foram gerados para a estação POLI, com ângulos de corte de 0°, 5°, 10° e 20°. Aqui serão apresentados os gráficos para um ângulo de corte de 10°.

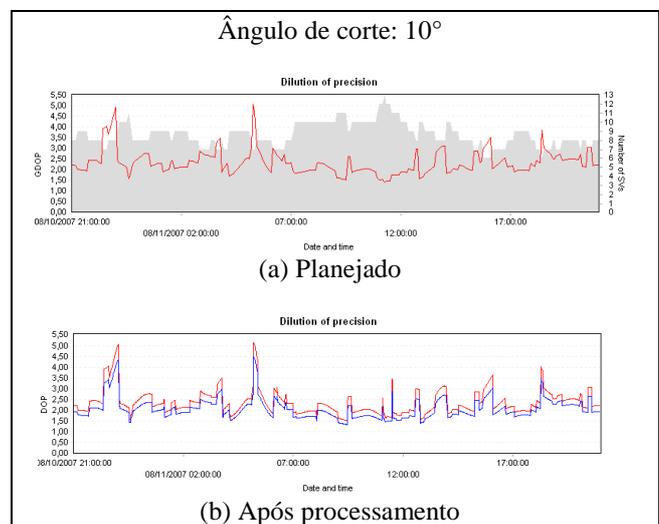


Figura 7 – Gráficos comparativos para a estação POLI com ângulo de corte de 10°

Com a análise dos gráficos gerados foi possível notar que, exceto o caso com ângulo de corte de 0°, a coincidência entre os gráficos é bastante grande, ou seja, é possível confiar nos dados de planejamento. Nos locais onde houve diferença, ocorreu uma situação em que o sinal de determinado satélite não foi usado.

4.2 Desenvolvimento da Etapa 2:

A segunda etapa compreende o seguinte estudo: *Com o mesmo GDOP móvel, como se comporta aumentando-se a linha base considerando que o GDOP resultante considera apenas os satélites usados no processamento.*

Tomando a estação ONRJ como objeto de estudo, outras estações podem ser usadas para formar linhas-base e verificar as diferenças da geometria entre as estações à medida que são escolhidos pontos que se afastam dela. A estação ONRJ foi adotada como se fosse um ponto móvel, enquanto as demais bases seriam consideradas referência. As estações utilizadas e as respectivas distâncias com relação à base ONRJ são apresentadas a seguir:

Tabela 3 – Distância aproximada entre cada uma das bases com relação à estação ONRJ

Estação	linha-base (km)
RIOD	12
CHPI	182
UBAT	205
VARG	272
MGIN	325
POLI	366
PPTTE	846
MSCG	1200
CUIB	1570
ROGM	2684
POVE	2687
RIOB	2954
CRUZ	3528

A análise visual dos gráficos apresenta a variação do GDOP por um período de 24h para as estações comparando os valores reais (informações tiradas do levantamento) antes e depois dos processamentos. As diferenças encontradas representam um recálculo do GDOP utilizando apenas os satélites simultaneamente rastreados entre as bases e utilizados no processamento. Aqui será apresentado um dos gráficos gerados para análise.

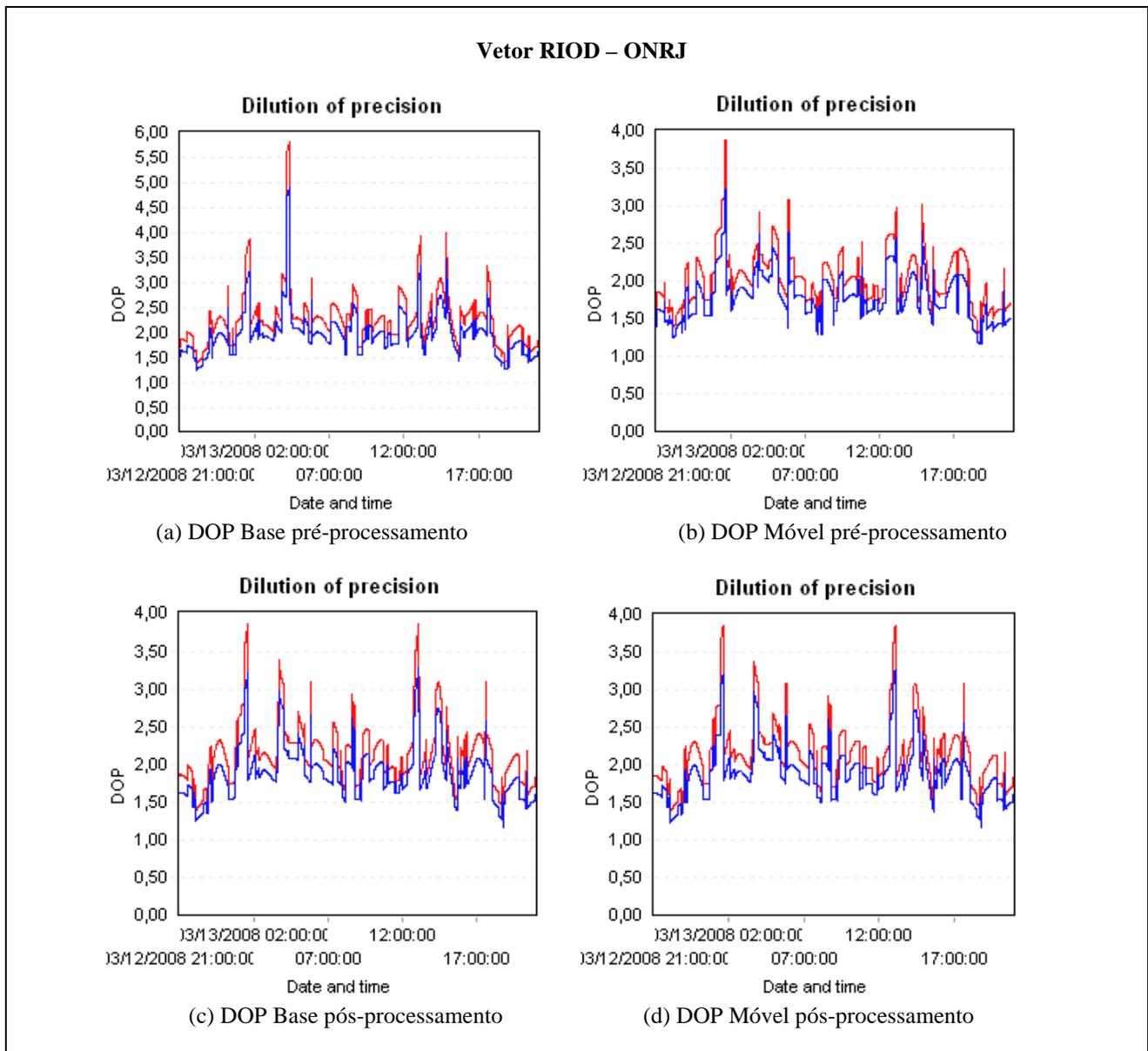


Figura 8 – Gráficos para o vetor RIOD – ONRJ.

A primeira constatação que pôde ser feita é a relação que existe entre os gráficos gerados após o processamento. Mesmo para as estações mais distantes o resultado é bastante similar. Outra tendência que ocorre em alguns casos é aquela em que o pior valor de DOP para uma das bases é o que permanece no final para ambas. Apenas em um caso, na Figura 8, para a linha-base RIOD-ONRJ, aparece uma situação em que um pico (aproximadamente 6) não aparece no resultado final.

O mais importante é salientar aqui um dos motivos pelo qual as técnicas atuais de planejamento de missões são falhas. Por não considerar o posicionamento relativo, o gráfico com valores estimados acaba sendo diferente do resultado real. E mostrou que, mesmo com a constelação completa, no posicionamento relativo não são raras as ocasiões em que os valores de DOP atingem picos.

4.3 Desenvolvimento da Etapa 3:

A terceira etapa compreende o seguinte estudo: *Análise de picos e sua influência nos resultados.*

Nessa etapa o intuito é verificar, a partir da informação do GDOP de pontos processados, qual a real influência dos chamados picos de GDOP. Para tanto, os arquivos foram divididos em sessões de 1h para que fossem processadas diferentes combinações com esses períodos que incluem picos. Foi feito o processamento com dados do horário com pico, e combinado com dados da hora anterior, da hora posterior e com ambos. Também foram levados em consideração diferentes comprimentos de linha-base. Foram considerados picos os valores de GDOP maiores do que 4 (quatro). As estações selecionadas são apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 5 – Linhas-base para análise de picos

Referência	Medido	Dimensão aproximada
CHPI	ONRJ	182 km
PPTE	ONRJ	846 km
POVE	ONRJ	2687 km

Foi usado como parâmetro de qualidade o RMS da solução.

Embora a retirada de um satélite (ou a rejeição do uso das observações pelo programa de processamento) em geral represente um aumento dos valores de DOP, situação diferente foi encontrada, pelo seguinte motivo: nos processamentos utilizando-se dados de 24h, foram identificadas situações onde ocorrem saltos de DOP. O resultado, no entanto, que é fruto do processamento de dados de um dia inteiro de observações, parece não ser afetado por esse pico. A idéia, portanto, seria processar apenas o período onde o pico foi identificado. Como neste trecho, alguns satélites são coletados por um período curto de tempo, com poucas observações, e combinando com a sua possível baixa elevação (por estar prestes a sair do horizonte da antena), acaba sendo rejeitado pelo programa de processamento. Surpreendentemente, os valores de DOP neste caso acabaram diminuindo e a

situação de pico não foi mais encontrada. É provável que o programa analise o DOP de forma iterativa para excluir determinada informação que esteja causando esse pico. Como o *software* não esclarece os motivos pelo qual ignora determinado conjunto de observações, não foi possível alterar as configurações para que esses dados fossem utilizados mantendo o pico original. Os gráficos a seguir ilustram esta situação.

Primeiramente, é analisado o gráfico de DOP para o processamento da linha-base com duração de 24h, e verifica-se a ocorrência do pico ocorre por volta das 14h45. A imagem abaixo apresenta o gráfico de DOP para o intervalo onde ocorre o pico (ainda com dados de 24h):

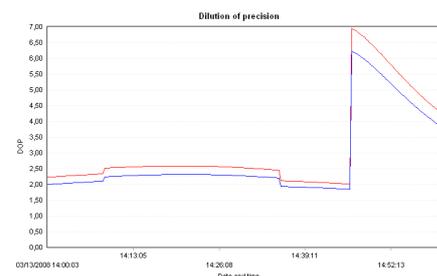


Figura 10 – Gráfico de DOP para a linha-base CHPI-ONRJ para um período de 1h.

Quando é gerada uma janela para a estação móvel ONRJ, para o intervalo entre 14 e 15h, ou seja, com todo o restante das observações excluídas, obtiveram-se os seguintes gráficos de DOP e visibilidade (mas mantendo os dados da base para o período de 24h disponíveis, sem janela de observação):

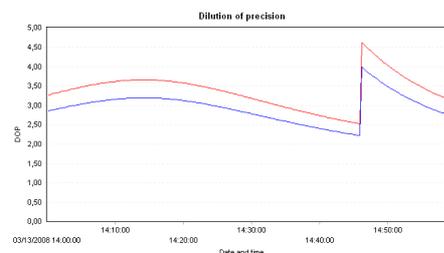


Figura 11 – Gráfico de DOP para a linha-base CHPI-ONRJ com janela (móvel).

Ainda numa terceira situação a janela é criada para ambas as estações, e o gráfico de DOP resultante é o seguinte:

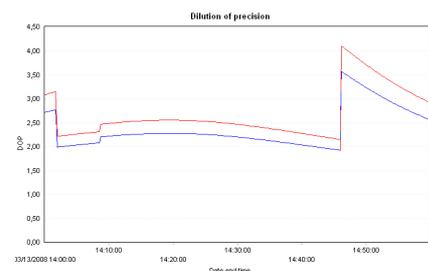


Figura 12 – Gráfico de DOP para a linha-base CHPI-ONRJ com janela.

O gráfico apresentado é ligeiramente diferente do anterior.

Do primeiro para o segundo caso, um trecho das observações do satélite 28 foi rejeitado e inverteu-se o uso entre os satélites 12 e 9. Já no último gráfico percebe-se que as observações do satélite 12 foram novamente usadas (apenas algumas observações, por volta de 2 min, foram retiradas no início) assim como do início do satélite 28. Desta forma foi necessário fazer uma mudança na estratégia, já que a retirada de um satélite pode não melhorar ou piorar os valores de GDOP, mas a substituição também tende a criar este efeito.

Por fim, embora haja uma redução substancial do valor de DOP para as janelas selecionadas, o teste foi realizado, pois ainda assim esses instantes mantiveram valores de DOP acima de 4. Portanto foram adotados locais onde originalmente, no processamento com dados de 24h, o pico maior ocorreu. Os resultados são apresentados a seguir.

➔ **Linha-base CHPI-ONRJ** (pico: entre 14 e 15h)

Tabela 6 – Resultados CHPI-ONRJ

Período	GDOP			RMS (m)
	Médio	Máx	Mín	
14h-15h	3,345	2,523	4,629	0,0045
13h-14h	3,793	3,004	4,562	0,0025
15h-16h	3,622	2,634	5,478	0,0023
13h-15h	2,921	1,864	4,629	0,0022
14h-16h	2,961	1,727	5,142	0,0023
13h-16h	2,881	1,864	4,065	0,0027

➔ **Linha-base PPTE-ONRJ** (pico: entre 14 e 15h)

Tabela 7 – Resultados PPTE-ONRJ

Período	GDOP			RMS (m)
	Médio	Máx	Mín	
14h-15h	2,896	1,908	5,142	0,0177
13h-14h	2,217	1,776	3,197	0,0044
15h-16h	2,574	2,070	3,481	0,0041
13h-15h	2,557	1,776	5,142	0,0028
14h-16h	2,735	1,908	5,142	0,0050
13h-16h	2,562	1,776	5,142	0,0012

➔ **Linha-base POVE-ONRJ** (pico: entre 14 e 15h)

Tabela 8 – Resultados POVE-ONRJ

Período	GDOP			RMS (m)
	Médio	Máx	Mín	
14h-15h	3,782	2,330	5,142	0,1274
13h-14h	2,264	1,864	3,197	0,0857
15h-16h	2,834	1,837	3,990	0,0071
13h-15h	3,023	1,864	5,142	0,0240
14h-16h	3,308	1,837	5,142	0,0682
13h-16h	2,960	1,837	5,142	0,0119

Os resultados apresentados indicam que a presença de picos não interfere de forma significativa no resultado. Embora se tenha verificado que no instante onde ocorreria o pico, a precisão é um pouco pior, essa variação é ainda muito pequena. De qualquer forma, esta situação corresponde ao exposto por Menzori (2005) que indica que se o levantamento foi realizado nas mesmas condições, muito provavelmente cabe à mudança da geometria a responsabilidade pelas mudanças de precisão dos resultados.

Pôde-se verificar que o horário de pico foi o mesmo para as três linhas-base, inclusive os valores de GDOP e PDOP máximo foram similares. Isso demonstra a contribuição da geometria na estação ONRJ no cálculo final.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo descrever o conceito da Diluição da Precisão e examinar o importante papel que a geometria antena receptora / satélites tem na determinação precisa da posição GPS. Esta geometria sempre terá um ponto decisivo no posicionamento GPS, embora se acredite que uma série de melhorias no desenvolvimento de receptores e o uso de sinais adicionais GLONASS e GALILEO poderão ajudar a minimizar esse impacto. De qualquer forma, estes sinais permitirão ou facilitarão o uso dos equipamentos em situações nas quais não eram possíveis, como em ambientes de alta obstrução, como *canyons* urbanos, mas não darão fim ao problema.

O que se tem verificado, no entanto, é que os padrões atuais de indicação das condições geométricas não garantem com segurança a precisão das determinações, como no caso do GDOP.

Não há dúvida de que existe a necessidade de se considerarem outros fatores, relevantes ao processo de medição com o GPS, entender as suas influências e as incertezas que eles se originam, para gerar um planejamento mais amplo e que produza um resultado final controlado (MENZORI, 2005).

Os usuários da tecnologia GNSS costumam considerar uma série de fatores comumente relacionados à influência da geometria dos satélites na qualidade do posicionamento. Foi feita uma investigação para verificar a veracidade dessas considerações, que serão apresentadas a seguir.

Quando se diz: o posicionamento tem 'geometria ruim', isso significa que o intervalo que caracteriza a precisão dos resultados está maior do que o 'habitual'. O mesmo efeito da geometria dos satélites ocorre diferentemente no posicionamento horizontal e vertical. Esse é o motivo pelo qual o valor da precisão do posicionamento (PDOP) ser representado de forma reduzida pelos componentes horizontal (HDOP) e vertical (VDOP). A precisão depende também do tempo, representado pelo TDOP. Os elementos orbitais dos satélites são conhecidos, então sua posição relativa ao ponto de observação pode ser calculada a qualquer

momento. Então, os valores DOP são interessantes no planejamento da coleta onde a posição e o tempo podem ser previstos. Embora, desde o momento em que a constelação GPS tornou-se completa esta questão tem perdido a importância, no entanto, discussões sobre o DOP são levantadas (KRAUTER, 1999):

Costuma-se dizer que todo valor de DOP sempre é maior que 1. Se o DOP expressa a diluição da precisão e trata-se de um multiplicador, então é esperado de qualquer forma que seja sempre maior que 1. No entanto, na prática, pode ocorrer PDOP menor que 1 quando há mais de 9 satélites visíveis. Conforme citado anteriormente, segundo Yarlagadda et al. (1997) para 4 satélites sempre $GDOP \geq \sqrt{2}$.

A determinação de altura é menos precisa que o posicionamento horizontal, assim, o VDOP sempre é maior que o HDOP. Esse efeito ocorre devido ao fato de que apenas os satélites acima do horizonte podem ser observados. Krauter (1999) define essa situação como “não-simétrica”. As coordenadas horizontais não sofrem efeito semelhante porque normalmente recebem-se sinais de todo os lados. Se os sinais emitidos pelos satélites pudessem atravessar a superfície terrestre, poder-se-ia obter coordenadas verticais com a mesma precisão das coordenadas horizontais.

No caso de quatro satélites, o valor de PDOP é inversamente proporcional ao volume de um tetraedro formado pela antena do receptor e os satélites. Segundo Hsu (1994), analisando-se matematicamente as expressões fracionadas dos DOPs, mostra-se que essa afirmação não é verdadeira, principalmente no que diz respeito ao HDOP.

Além disso, segundo Krauter (1999), o PDOP calculado geometricamente tem uma série de desvantagens:

- Não pode ser usado com mais de quatro satélites;
- Seus componentes (HDOP e VDOP) quase não podem ser interpretados geometricamente;
- Em alguns casos o valor matemático do PDOP não tende a diminuir quando o volume do tetraedro aumenta;
- O volume do tetraedro se torna zero (e PDOP geométrico se torna infinitamente alto) quando os quatro satélites estão alinhados. O PDOP matemático só fica infinitamente alto se o ponto de observação também estiver alinhado neste plano.

Santerre (1991) sugere que o desenvolvimento de um programa de simulação pode ser usado como uma ferramenta de planejamento generalizada, fornecendo não apenas informações de covariâncias, mas também a influência de importantes erros sistemáticos nos resultados do posicionamento. O desenvolvido método poderia ser usado no lugar do critério GDOP para caracterizar a eficácia da distribuição dos satélites. As razões para rejeitar o uso do critério baseado no valor GDOP com propósitos de análise do posicionamento estático se devem ao fato de que o parâmetro GDOP ser

unicamente baseado em uma época de observações não sendo um bom indicador da distribuição dos satélites para uma sessão completa.

Uma das maiores limitações dos indicadores atuais refere-se ao fato de serem indicadores pontuais, calculado a cada época, enquanto o conceito de precisão envolve a repetição de medições. Supondo que no planejamento fosse considerada a duração da sessão de levantamento, o gráfico gerado deveria ser algo próximo de uma curva tendendo a zero.

REFERÊNCIAS

GAKSTATTER, E. (2008). **Is Dual-Frequency GPS — As We Know It — Becoming Obsolete?** GPS World Web Site. Disponível em www.gpsworld.com. Acesso em 22/06/2008

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTHEGGER, H. e COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. Fifth Edition. Wien: Springer-Verlag, 2001. 382 p.

HSU, D. Y. **Relations Between Dilutions of Precision and Volume of the Tetrahedron Formed by Four Satellite**. Litton Guidance and Control Systems. Woodland Hills, CA. 1994.

KAPLAN, E. D. **Understanding GPS: Principles and Applications**. Artech House Publishers. Boston, London. 1996. 554 p.

KRAUTER, A. Role of the Geometry in GPS Positioning, **Per. Pol. Civil Eng.** 1999. p. 43-53.

LANGLEY, R. B. Dilution Of Precision. **GPS WORLD Magazine**. May, 1999 pg. 52-59.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 1995. 560 p.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2004. 435 p.

MENZORI, M. **Classificação da Exatidão de coordenadas obtidas com a fase da portadora L1 do GPS**. 2005. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos.

SANTERRE, R. Impact of GPS satellite sky distribution. in: **Manuscripta Geodaetica**. Vol. 16, 1911, 1991. pp. 28-53.

YARLAGADDA, R.; ALI, I.; AL-DHAHIR, N. e HERSHEY, J. Geometric Dilution of Precision (GDOP): Bounds and Properties. **Technical Information Series**. GE Corporate Research and Development. 1997.