

EXPERIÊNCIAS SOBRE A ACURÁCIA OBTIDA NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO UTILIZANDO PSEUDODISTÂNCIAS SUAVIZADAS

Experiences about the obtained accuracy on the point positioning using smoothed pseudoranges

MAURICIO IHLENFELDT SEJAS¹
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER¹

¹Universidade Federal do Paraná
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geomática
Curitiba - Paraná - Brasil
msejas@ufpr.br ; ckrueger@ufpr.br

RESUMO

A finalidade deste trabalho é verificar a acurácia obtida no posicionamento absoluto quando se utilizam pseudodistâncias suavizadas pela fase da onda portadora. Para alcançar esse objetivo, um algoritmo de suavização foi implementado em um programa computacional, onde os resultados obtidos foram analisados estatisticamente por meio do teste qui-quadrado e pelos desvios médios de cada amostra. Outros dois experimentos foram realizados para analisar a acurácia do posicionamento absoluto, quando são empregadas as observáveis originais (código C/A) e as suavizadas pela onda portadora L_1 . Os levantamentos de campo foram realizados sobre as estações RM03 e CANG, e as observações foram coletadas com receptores Ashtech-Z12 e Trimble 4000 SSI, com uma taxa de coleta de dados de 5 segundos. Um dos experimentos tinha por objetivo avaliar os resultados obtidos pelo programa desenvolvido. Para um conjunto de amostras foram comparados os valores suavizados gerados pelo próprio receptor com os calculados pelo algoritmo, e os resultados foram testados pelo qui-quadrado. Verificou-se que apenas 52% das amostras não foram rejeitadas pelo teste a um nível de confiança de 95%. Para cada época de observação foram calculados desvios, resultantes da diferença entre os valores gerados pelo receptor e os calculados pelo algoritmo, e um valor médio para cada amostra. Os resultados mostraram que 70% das amostras apresentaram desvios

médios inferiores a 40 cm. Outros dois experimentos foram conduzidos com o propósito de analisar a acurácia do posicionamento absoluto. Foram utilizadas as observações das estações RM03 e CANG, e os resultados de acurácia mostraram que os posicionamentos que utilizaram pseudodistâncias suavizadas pela onda portadora L_1 foram mais precisos que aqueles que empregaram as pseudodistâncias originais.

Palavras-chave: Posicionamento absoluto; Suavização da Pseudodistância; Posicionamento por ponto.

ABSTRACT

The goal of this work is to check the obtained accuracy on the point positioning when smoothed pseudoranges used by the carrier phase. In order to reach this goal, a smoothing algorithm was implemented in a computer program, in which the results were statistically analyzed through the chi square test and through the average deviation of each sample. Two other experiments were made to analyze the accuracy of the point positioning, when the original pseudorange (from C/A code) and the pseudorange smoothed by the carrier phase (L_1) are used. The field survey was carried out on the RM03 and CANG stations, and the observations were collected from Ashtech-Z12 and Trimble 4000 SSi receivers in a 5 second collecting rate. One of the experiments had as a goal to evaluate the results obtained by the developed program. One set of samples had the smoothed values generated by the receiver itself compared to the ones calculated by the algorithm and the results were tested by the chi square test. We noticed that only 52% of the samples weren't rejected by the test at a 95% confidence level. Every observation epoch had a deviation value, resulting from the difference between the values generated by the receiver and the calculated by the algorithm, calculated for every sample. The results show that 70% of the samples had average deviation under 40 cm. Other two experiments were held in order to analyze the accuracy of the point positioning. The observations from the RM03 and CANG stations were used and the accuracy results showed that the positioning that used the pseudoranges smoothed by the carrier phase (L_1) were more accurate than those that used the original pseudoranges.

Keywords: Absolute positioning; Pseudorange smoothing; Point positioning..

1. INTRODUÇÃO

Segundo HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994, p. 96), as primeiras investigações sobre a suavização da pseudodistância foram conduzidas por Ron Hatch, em 1982. Aplicações e melhoramentos foram propostos mais tarde por HATCH e LARSON (1985), HATCH (1986) e outras pequenas variações foram propostas por LACHAPELLE et al. (1986).

A suavização da pseudodistância do código é um processo que combina as não ambíguas, porém imprecisas medidas dos códigos, com as ambíguas, no entanto,

precisas medidas de fase das ondas portadoras. A idéia está em aproveitar o baixo ruído das medidas de fase, de poucos milímetros, para reduzir os ruídos das medidas do código, que são de alguns metros. Desta forma, novas pseudodistâncias (mais precisas) são obtidas sem a necessidade de se resolver as ambigüidades.

O objetivo deste trabalho é analisar a técnica de suavização da pseudodistância mediante os resultados de acurácia obtidos em posicionamentos absolutos, onde foram utilizadas as observações de pseudodistância originais (não suavizadas) e as suavizadas pela onda portadora L_1 .

2. COMBINAÇÕES LINEARES DE OBSERVÁVEIS GPS

As observáveis GPS são geradas pelos códigos ou pela fase da onda portadora. Desta forma, se for empregado um receptor de dupla frequência em um levantamento, é possível obter pelo menos cinco observáveis diretas: as fases das ondas portadoras para as duas frequências (Φ_{L1} e Φ_{L2}); as pseudodistâncias do código C/A (PD_{C1}); e as pseudodistâncias do código preciso P, denominadas PD_{L1} e PD_{L2} . Mas ainda é possível combinar essas observáveis entre si e gerar uma série de outras observáveis, cada uma com suas características próprias. SEEBER (1993, p. 254) apresenta cinco diferentes tipos de combinações lineares que podem ser efetuadas entre as observações: de diferentes estações; de diferentes satélites; de diferentes épocas; do mesmo tipo e de diferentes tipos. Na seqüência serão apresentados com maiores detalhes somente os dois últimos tipos de combinações, pelo fato dos demais não estarem diretamente ligados a este trabalho.

2.1 Combinações Entre Observações do Mesmo Tipo

O principal objetivo das combinações lineares da fase da portadora é eliminar o efeito da ionosfera ou resolver as ambigüidades inteiras. Segundo WELLS et al. (1986, p. 8.4), dependendo do tipo de aplicação e o nível de acurácia que se procura, existem vantagens e desvantagens em certas combinações.

A combinação linear de medidas de fase das duas portadoras (Φ_{L1} e Φ_{L2}) pode ser definida pela relação (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994, p. 95):

$$\Phi_{CL} = n_1\Phi_{L1} + n_2\Phi_{L2} \quad (1)$$

onde:

Φ_{CL} é a observável resultante da combinação linear;

n_1 e n_2 são números reais;

Φ_{L1} e Φ_{L2} são as medidas da fase das ondas portadoras L_1 e L_2 , respectivamente.

2.2 Combinações Entre Observações de Diferentes Tipos

A suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora é uma técnica que combina observações de diferentes tipos. O termo suavização da pseudodistância, adotado do inglês *pseudorange smoothing*, é o mais difundido na literatura, apesar de também poder aparecer como filtragem da pseudodistância. Porém, neste trabalho o termo *suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora* é o que será adotado, sendo que os algoritmos serão denominados de filtros de suavização.

Assumindo que se tenham observações nas duas portadoras, sendo elas as medidas de pseudodistância a partir dos códigos P (PD_{L1} e PD_{L2}) e as medidas da fase da onda portadora (Φ_{L1} e Φ_{L2}), as primeiras (código) serão transformadas em ciclos dividindo-as pelos correspondentes comprimentos de onda das portadoras, gerando PD_{L1}^c e PD_{L2}^c , onde o índice c indica que as medidas estão em ciclos. Generalizando as fórmulas para uma época arbitrária t_i , tem-se seguintes as observáveis:

$$PD_{L1}^c(t_i) = \frac{PD_{L1}(t_i)}{\lambda_{L1}} \quad (2)$$

$$PD_{L2}^c(t_i) = \frac{PD_{L2}(t_i)}{\lambda_{L2}} \quad (3)$$

onde λ_{L1} , λ_{L2} são os comprimentos de onda para as portadoras L_1 e L_2 respectivamente.

Empregando as duas frequências (f_{L1} e f_{L2}), pode-se escrever, para cada época, a seguinte combinação linear para as pseudodistâncias a partir dos códigos (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994, p. 96):

$$PD^c(t_i) = \frac{f_{L1}PD_{L1}^c(t_i) - f_{L2}PD_{L2}^c(t_i)}{f_{L1} + f_{L2}} \quad (4)$$

e também uma segunda combinação para a fase da onda portadora, que corresponde à combinação linear *wide lane* (Φ_w):

$$\Phi_w(t_i) = \Phi_{L1}(t_i) - \Phi_{L2}(t_i) \quad (5)$$

A frequência e o comprimento de onda das observações em L_1 e L_2 e das combinações do código (PD^c) e da fase (Φ_w) são apresentados na tabela 1, onde observa-se que a frequência para as combinações PD^c e Φ_w são as mesmas e, portanto, o comprimento de onda também.

Tabela 1. Combinações lineares

Observável	n ₁	n ₂	f (MHz)	λ (cm)
Φ _{L1}	1	0	1575,42	≅ 19,03
Φ _{L2}	0	1	1227,60	≅ 24,42
Φ _W	1	-1	347,82	≅ 86,19
PD ^c	-	-	347,82	≅ 86,19

FONTE: adaptada de SEEBER (1993, p. 259).

Assim, para cada época, as equações do código calculado (PD_c^c) e do código suavizado pela portadora (PD_s^c) podem ser escritas conforme as equações 6 e 7 (HATCH, 1986, p. 1294):

$$PD_c^c(t_i) = PD_s^c(t_{i-1}) + [\Phi_w(t_i) - \Phi_w(t_{i-1})] \quad (6)$$

$$PD_s^c(t_i) = \frac{1}{i} \cdot PD_c^c(t_i) + \left(\frac{i-1}{i}\right) \cdot PD_s^c(t_i) \quad (7)$$

as quais devem obedecer, quando $i=1$, à seguinte condição inicial: $PD_c^c(t_1) = PD_s^c(t_1) = PD_c^c(t_1)$. Para todas as épocas i maiores que 1, usar recursivamente as equações 6 e 7. Finalmente, a pseudodistância na unidade do metro ($PD_s(t_i)$) é dada pelo produto da pseudodistância em ciclos pelo comprimento de onda da combinação linear.

Para casos em que se têm disponíveis as observáveis da pseudodistância e da fase apenas na portadora L_1 , as equações para uma época arbitrária t_i são dadas pelas equações 8, 9 e 10, com a condição inicial $PD_{L1}^c(t_1) = PD_c^c(t_1) = PD_s^c(t_1)$, sendo que para $i \geq 2$ usar recursivamente as expressões dadas.

$$PD_{L1}^c(t_i) = \frac{PD_{L1}(t_i)}{\lambda_{L1}} \quad (8)$$

$$PD_c^c(t_i) = PD_s^c(t_{i-1}) + [\Phi_{L1}(t_i) - \Phi_{L1}(t_{i-1})] \quad (9)$$

$$PD_s^c(t_i) = \frac{1}{i} \cdot PD_{L1}^c(t_i) + \left(\frac{i-1}{i}\right) \cdot PD_s^c(t_i) \quad (10)$$

Como as fases das ondas portadoras são sensíveis a saltos de ciclo, LACHAPELLE et al. (1986) propôs um algoritmo onde é incluído um fator de peso dependente do tempo (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994, p. 97). Usando as mesmas notações para uma época t_i , o código suavizado pela portadora é dado por:

$$PD_s^c(t_i) = \omega \cdot PD^c(t_i) + (1 - \omega) \cdot [PD_s^c(t_{i-1}) + \Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})] \quad (11)$$

onde ω é um fator de peso. Para a primeira época ($t_i = 1$) o peso é fixado como sendo igual a 1, desta forma, a pseudodistância suavizada torna-se numericamente igual a pseudodistância observada, pois o segundo termo do lado direito da equação (11) é anulado. Progressivamente, o peso ω é decrescido e maior importância é dada para o termo que contém as medidas de fase. LACHAPELLE et al. (1986, p. 1334) sugere que para um total de 100 observações, pode-se aplicar para o peso ω um fator de redução de 0,01, desde que não ocorram saltos de ciclo, quando o filtro deverá ser reiniciado ($\omega = 1$). Para maiores informações, consultar SEJAS (2005) que apresenta outras considerações sobre o fator de redução que pode utilizado para este algoritmo.

O filtro proposto por LACHAPELLE et al. (1986) é uma pequena variação do filtro apresentado por HATCH (1986). Observa-se que a equação de suavização (equação 11) de LACHAPELLE et al. (1986) será semelhante à equação 7 se o fator de peso ω for igual ao inverso do número de épocas ($1 / i$).

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Suavização Realizada pelos Receptores GPS

Alguns receptores GPS realizam, durante a coleta dos dados, a suavização do código pela portadora, como é o caso de alguns receptores da Ashtech e da Leica. Arquivos de observações provenientes dos receptores Ashtech Z-12 (arquivos binários) têm armazenado tanto as pseudodistâncias originais (*raw range*) como as correções de suavização da pseudodistância (*range smoothing correction*). Segundo o manual do fabricante (ASHTECH, 1994, p. 145), a pseudodistância suavizada é obtida subtraindo-se o valor da pseudodistância original com a correção de suavização. Um exemplo de um arquivo ASCII gerado a partir de um arquivo binário do receptor Ashtech Z-12 é apresentado na figura 1. As observações foram coletadas na estação RM03, localizada próxima ao Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE), da Universidade Federal do Paraná.

Figura 1- Parte de um arquivo ASCII gerado a partir de um arquivo binário do receptor ASHTECH-Z12

RECORD = 451		RECEIVE TIME = 497855.000000								
SV	WN	G	TXMTIME	CDPHSE	CARRIER_PH	SMOOTH	SM_CNT	DTYPE		
20	2	24	0.920570233	23812444.978	-12994635.555	-0.710	200	L1		
	32	22	0.920570237	23812443.821	-12994635.555	-0.860	200	L1P		
	32	22	0.920570179	23812461.370	-10107634.459	-0.940	200	L2P		
19	2	24	0.926019040	22178933.821	-2560783.487	0.870	200	L1		
	32	22	0.926019045	22178932.473	-2560783.485	0.820	200	L1P		
	32	22	0.926019000	22178945.863	-1985930.671	0.920	200	L2P		
3	2	24	0.921338961	23581986.370	2078145.526	0.260	200	L1		
	32	22	0.921338965	23581985.088	2078145.524	-0.460	200	L1P		
	32	22	0.921338895	23582005.979	1618044.528	1.170	200	L2P		
15	2	24	0.920569352	23812709.317	-275186.009	0.700	200	L1		
	32	22	0.920569351	23812709.370	-275186.004	1.630	200	L1P		
	32	22	0.920569295	23812726.267	-211439.443	-0.640	200	L2P		
25	2	24	0.927031108	21875523.520	-15737222.357	-0.570	200	L1		
	32	22	0.927031108	21875523.557	-15737222.361	-0.120	200	L1P		
	32	22	0.927031060	21875538.025	-11876237.552	0.370	200	L2P		
1	2	24	0.932141824	20343369.485	-10689053.550	-0.010	200	L1		
	32	22	0.932141825	20343369.138	-10689053.549	0.390	200	L1P		
	32	22	0.932141785	20343381.189	-8305608.223	-0.190	200	L2P		
14	2	24	0.922911645	23110507.421	1631473.933	1.720	200	L1		
	32	22	0.922911652	23110505.453	1631473.935	0.430	200	L1P		
	32	22	0.922911603	23110519.954	1271409.564	0.320	200	L2P		
23	2	24	0.920332951	23883580.293	-12611883.760	-0.050	200	L1		
	32	22	0.920332957	23883578.686	-12611883.758	-0.830	200	L1P		
	32	22	0.920332894	23883597.486	-9793416.820	0.290	200	L2P		
11	2	24	0.927070414	21863739.909	-16573255.477	0.080	200	L1		
	32	22	0.927070415	21863739.636	-16573255.475	0.440	200	L1P		
	32	22	0.927070375	21863751.686	-12898842.276	-0.320	200	L2P		

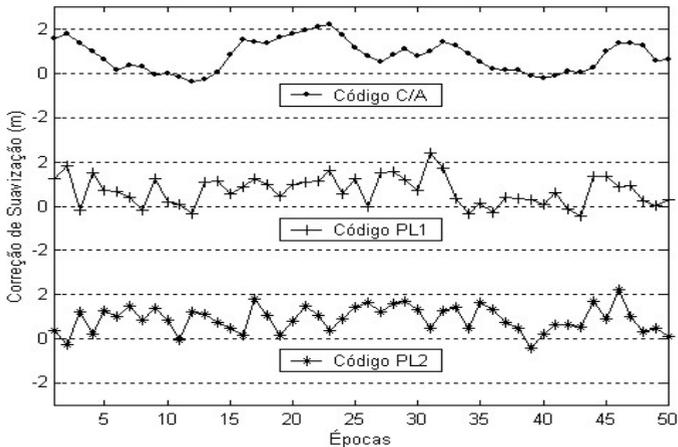
NOTA: estação RM03, dia 22/10/2004.

Segundo o manual do fabricante (ASHTECH, 1994, p. 145), SMOOTH representa a correção de suavização da pseudodistância, em metros, obtido pela subtração da pseudodistância medida (original) pela pseudodistância suavizada. SM_CNT é o número de passos executados na suavização. No processo completo as épocas são iniciadas em 0 e terminadas em 200, sendo que 2 passos são realizados a cada meio segundo, portanto o processo completo tem um tempo de duração de 50 segundos. Informações complementares a respeito dos demais elementos presentes na figura 1 podem ser encontradas em ASHTECH (1994).

A figura 2 mostra as correções de suavização da pseudodistância para os códigos C/A, P_{L1} e P_{L2} , calculadas pelo receptor ASHTECH Z-12 no dia 22/10/2004 na estação RM03. Observa-se que as correções que serão aplicadas às observações originais dos códigos apresentaram valores máximos da ordem de 2,50 metros.

Os algoritmos de suavização apresentados anteriormente foram implementados em um programa computacional desenvolvido por SEJAS (2005) em linguagem Delphi. Este programa tem a função de suavizar as pseudodistâncias empregando o filtro de HATCH ou o de LACHAPELLE, para uma ou para as duas frequências.

Figura 2 - Correções de suavização da pseudodistância calculadas pelo receptor ASHTECH Z-12



NOTA: Estação RM03, dia 22/10/2004, PRN 03.

A seqüência de processamento consiste: leitura de um arquivo RINEX de observação; a escolha do filtro de suavização que será empregado e o número de épocas necessárias para reinicializar o filtro; e finalmente, a geração de um arquivo RINEX de observação, onde as observações do código C/A original são substituídas pelas observações do código suavizadas pela(s) portadora(s).

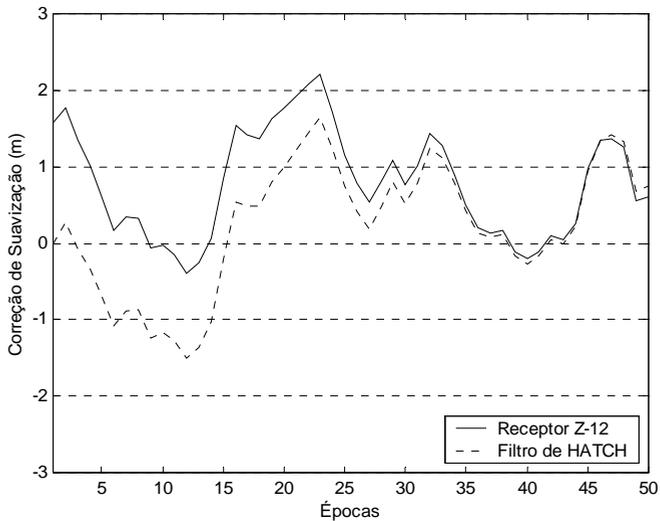
A avaliação dos resultados apresentados pelo programa foi realizada comparando-se as correções de suavização geradas com as calculadas pelo próprio receptor. As pseudodistâncias do código C/A para o satélite PRN 03 na estação RM03 foram suavizadas pela portadora L_1 e as correções de suavização calculadas são apresentadas na figura 03. Neste experimento utilizou-se um tempo total de suavização igual a 4 minutos e 10 segundos, o que corresponde a 50 épocas.

Observa-se na figura 03 que as correções de suavização da pseudodistância calculadas pelo filtro de HATCH apresentam um comportamento similar com aquelas calculadas pelo receptor. Apesar do manual do receptor não informar qual filtro é utilizado no processo de suavização, as evidências indicam que pode ser o de HATCH, pois, verifica-se que apesar da diferença inicial entre as duas correções ser da ordem de 1,5 metro (neste exemplo), à medida que aumentaram as épocas de suavização as diferenças decrescem significativamente.

Uma das explicações encontradas para essa diferença inicial é devido ao fato do tempo de suavização ser diferente nos dois processos, pois, quando o filtro foi iniciado no processo de suavização o receptor já estava suavizando as pseudodistâncias por um determinado tempo, sendo este desconhecido. Uma outra

explicação está no fato do intervalo de coleta dos dados ser diferente nos dois processos, onde o receptor calcula as correções de suavização com um intervalo menor que aquele utilizado pelo filtro implementado, ou seja, com um intervalo inferior à da coleta dos dados.

Figura 3 - Correções de suavização da pseudodistância (C/A) calculadas pelo receptor ASHTECH Z-12 e pelo filtro de HATCH



NOTA: Estação RM03, dia 22/10/2004, PRN 03.

Aplicou-se o teste estatístico Qui-Quadrado (χ^2) para verificar se as correções calculadas pelo receptor e pelo programa apresentam desvios não significativos. SOARES (2005, p. 56) apresenta a seguinte equação para este teste:

$$\chi_{\text{CALC}}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (12)$$

onde:

- O_i é o valor observado;
- E_i valor esperado;
- n número de parâmetros da amostra.

O valor de qui-quadrado calculado na equação 12 é comparado a um valor teórico obtido em função do número de graus de liberdade (ν) e do nível de

confiança $(1 - \alpha)$. As hipóteses a serem testadas são: hipótese básica (quando as frequências observadas são iguais às frequências esperadas) e a hipótese alternativa (quando as frequências observadas são diferentes das frequências esperadas). A hipótese básica (H_0) é aceita quando o valor calculado for inferior ou igual ao valor crítico, dentro de um certo nível de confiança. Caso contrário, ela é rejeitada e aceita-se a hipótese alternativa (H_1). Para maiores informações sobre o teste qui-quadrado, consultar GEMAEL (1994) e SOARES (2005).

Para o experimento em questão, foram utilizadas observações da estação RM03 do dia 28/05/2004. Para cada um dos 9 satélites observados pelo receptor nesta estação, foram escolhidas 3 amostras contendo 50 observações cada. O tamanho da amostra foi escolhido pelo fato de 50 épocas representarem um tempo de suavização adequado, segundo experimentos, além de apresentar observações em número maior que o mínimo necessário para o teste estatístico. O critério utilizado para a inclusão das amostras foi o da não ocorrência de saltos de ciclo entre a primeira e a quinquagésima observação, pois a ocorrência de saltos de ciclo provoca a reinicialização do filtro de suavização. Quanto ao critério de exclusão, foram descartadas as observações que apresentaram valores esperados (E_i) nulos, pois este termo aparece no denominador da equação 12.

As observações das 27 amostras foram testadas pelo qui-quadrado e verificou-se que a hipótese básica foi aceita em apenas 52% dos casos, para um nível de confiança de 95% (tabela 2). O fato do tempo de início da suavização do receptor não coincidir com o tempo no qual o algoritmo implementado inicia, além de que a taxa de coleta dos dados é diferente nos dois processos, contribuíram para que aproximadamente metade das amostras fossem rejeitadas segundo a hipótese básica.

As mesmas observações da amostra que foi utilizada para gerar a figura 3 (que não passou no teste estatístico) foram também utilizadas em um novo processo de suavização, onde foram descartadas as dez primeiras observações. Verifica-se na figura 3 que na décima primeira época o valor esperado (gerados pelo receptor) é de -15 cm. Assim, a diferença inicial entre o valor esperado e o calculado pelo algoritmo será pequena (-15 cm, pois o valor calculado para a primeira época é sempre nulo, de acordo com a condição inicial imposta pelo algoritmo). O processo de suavização envolveu, neste experimento, apenas 40 observações, onde o teste qui-quadrado foi novamente utilizado, obtendo-se sucesso. Sabe-se que o tamanho da amostra influi no resultado final do teste, porém neste exemplo, verificou-se que a época com a qual se iniciou o processo de suavização foi quem determinou a aceitação ou rejeição do teste estatístico.

Para cada época foram obtidas diferenças entre os valores esperados e os calculados pelo algoritmo, chamados de desvios, e a média deles para cada amostra.

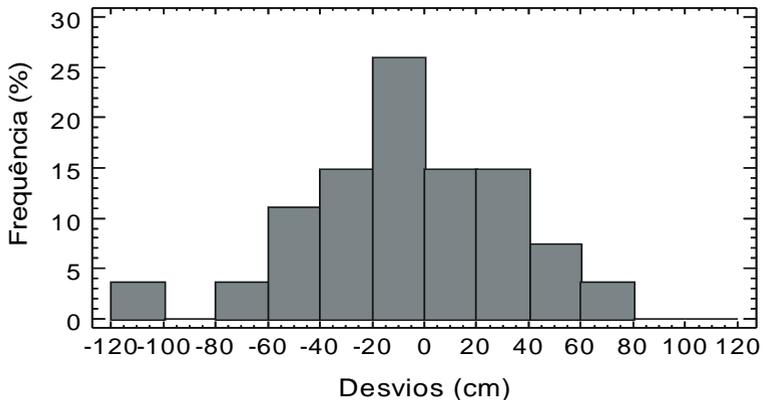
Tabela 2 - Teste Qui-Quadrado na comparação das correções de suavização obtidas pelo receptor ASHTECH-Z12 e pelo filtro de suavização

Número de Amostras Analisadas	27
Nível de Significância (α)	5%
Nível de Confiança ($1 - \alpha$)	95%
Teste Aceito	52% das amostras

Com exceção de uma amostra que apresentou um desvio médio pouco maior que o metro, as demais apresentaram valores máximos de 65 cm. A figura 4 apresenta um histograma de freqüências relativas, onde os desvios médios das 27 amostras foram separados em classes de 20 cm. Observa-se que em 40% dos casos os desvios médios foram inferiores a ± 20 cm, em 70% dos casos inferiores a ± 40 cm e em 80% inferiores a ± 60 cm.

Apesar do teste qui-quadrado não passar em quase metade das amostras, considerou-se que os resultados obtidos pelo algoritmo são válidos em função da tendência semelhante entre os valores esperados e os calculados e também pelo fato dos desvios médios serem inferiores a 50 cm para a maior parte das amostras.

Figura 4 - Histograma de freqüências para os desvios médios das 27 amostras



3.2 Efeito da Suavização no Posicionamento Absoluto

A qualidade do posicionamento onde se empregam pseudodistâncias suavizadas foi obtida por meio da acurácia de um posicionamento absoluto, no qual foram utilizados dois tipos de observáveis: as pseudodistâncias originais do código C/A e as pseudodistâncias do código C/A suavizadas pela onda portadora L_1 com aplicação do filtro de HATCH (equações 8 a 10). Foram empregadas as observações das estações CANG (dia 11/08/2004) e RM03 (dia 23/01/2005), coletadas por em receptor Trimble 4000 SSi. Como mencionado anteriormente, a estação RM03 localiza-se próxima ao LAGE, enquanto que a estação CANG está

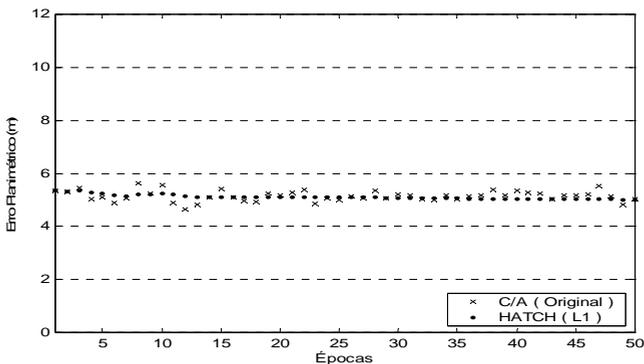
localizada na Fazenda Cangüiri (UFPR), distante aproximadamente 12 km da RM03. O processamento das pseudodistâncias foi realizado pelo programa desenvolvido por SEJAS (2005) em linguagem Delphi. A partir das observações oriundas de arquivos RINEX de observação e navegação, este programa permite ao usuário estimar para cada época as coordenadas da estação, utilizando o código como observável no processamento.

A figura 5 mostra os erros planimétricos para a estação CANG quando se empregaram as pseudodistância do código C/A originais e as observações do código C/A suavizadas pela portadora L_1 . E a figura 6, por sua vez, apresenta os erros altimétricos obtidos para essa mesma estação. A tabela 3 mostra que a média dos erros planimétricos obtidos para a estação CANG foram muito próximas (5,08 m e 5,03 m), e as diferenças nos desvios-padrão mostram que o posicionamento empregando as pseudodistâncias suavizadas foi mais preciso que aquele que empregou somente o código original. Para a altimetria, as médias dos erros também foram muito próximas, cerca de 11 m, porém nota-se que apesar dos desvios-padrão serem muito próximos (1,57 m e 1,62 m) as observações com o código C/A mostraram-se um pouco mais precisas que as pseudodistâncias suavizadas.

Tabela 3 - Média e desvios-padrão obtidos para a Estação CANG

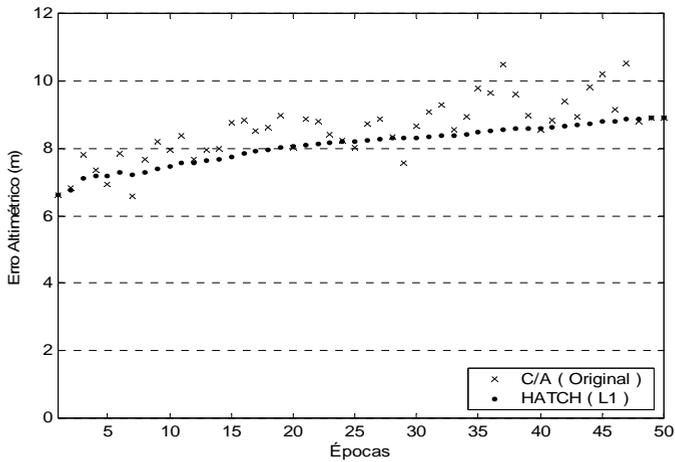
Estação CANG	Planimetria (m)		Altimetria (m)	
	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
C/A	5,08	0,24	11,16	1,57
HATC H	5,03	0,12	10,94	1,62

Figura 5 - Erros planimétricos para a Estação CANG



NOTA: Estação CANG, dia 11/08/2004, 8 satélites.

Figura 6 - Erros altimétricos para a Estação CANG



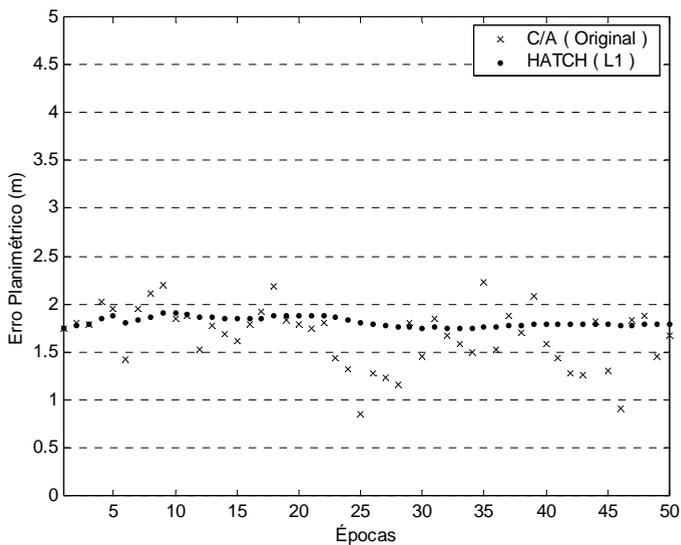
NOTA: Estação CANG, dia 11/08/2004, 8 satélites.

Os resultados obtidos para a estação RM03 (figuras 7 e 8) mostram que o posicionamento nesta estação foi mais acurado que na estação CANG. Observando a tabela 4, nota-se que o posicionamento que empregou pseudodistâncias suavizadas apresenta desvios-padrão de 5 cm para a planimetria e 7 cm para a altimetria, enquanto que o posicionamento que utilizou o código C/A original apresentou desvios de 31 cm e 57 cm para a planimetria e altimetria respectivamente (tabela 4).

Tabela 4 - Média e desvios-padrão obtidos para a Estação RM03

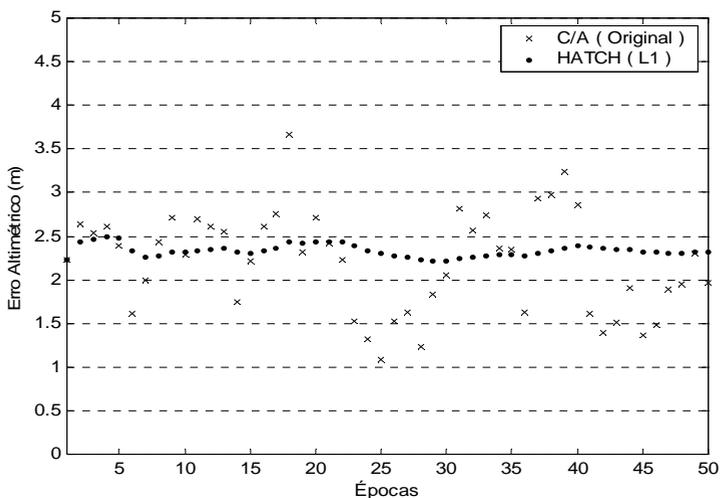
Estação RM03	Planimetria (m)		Altimetria (m)	
	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
C/A	1,67	0,31	2,20	0,57
HATC H	1,81	0,05	2,33	0,07

Figura 7 - Erros planimétricos para a Estação RM03



NOTA: Estação RM03, dia 23/01/2005, 7 satélites.

Figura 8 - Erros altimétricos para a Estação RM03



NOTA: Estação RM03, dia 23/01/2005, 7 satélites.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro experimento, realizado com as observações da estação RM03 (22/10/2004), tinha o objetivo de avaliar os resultados fornecidos pelo algoritmo implementado. Duas análises foram conduzidas neste sentido: teste qui-quadrado e análise dos desvios médios de cada amostra.

Aplicando o teste qui-quadrado para as 27 amostras verificou-se que em apenas 52% delas a hipótese básica foi aceita para um nível de confiança de 95%. Detectou-se que o principal motivo do teste ter sido rejeitado em 48% das amostras está na diferença inicial dos tempos de suavização do receptor e do algoritmo, bem como pelo fato do receptor utilizar mais observações no processo de suavização.

Para cada época de observação foram calculados os desvios entre os valores gerados pelo receptor e os calculados pelo algoritmo, sendo que o valor médio para cada amostra foi determinado. Verificou-se no histograma da figura 4 que 40% das amostras apresentaram valores médios inferiores a $\pm 20\text{cm}$ e 70% inferiores a meio metro. Como os desvios médios foram dessa ordem de grandeza e por observar que as correções de suavização do receptor e as calculadas apresentam a mesma tendência (figura 3), optou-se em aceitar o algoritmo desenvolvido.

Os próximos dois exemplos foram conduzidos com o objetivo de analisar a acurácia do posicionamento absoluto quando se emprega pseudodistâncias suavizadas. Foram utilizadas as observações das estações RM03 (23/01/2005) e CANG (11/08/2004), e os resultados mostraram que o posicionamento que empregou pseudodistâncias suavizadas foi mais preciso que aquele que utilizou as pseudodistâncias originais não suavizadas. As tabelas 3 e 4 mostraram que, com exceção da altimetria na estação CANG, os desvios padrão foram menores para os posicionamentos com as pseudodistâncias suavizadas.

Deve-se deixar claro que os resultados obtidos nos experimentos valem somente para as duas amostras aqui analisadas. Um conjunto maior de amostras devem ser utilizadas em outros experimentos, propiciando assim, um tratamento estatístico mais rigoroso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHTECH Z-12 GPS receiver operating manual. *Document Number 600224, revision B*. Publication date 1994.
- GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Editora UFPR, 1994.
- HATCH, R. Synergism of GPS code and carrier measurements. *Proceedings of The Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, New Mexico State university, Las Cruces, New Mexico, Feb., 1982, pp.1213-1232.

- HATCH, R.; LARSON, K. *MAGNET-4100 GPS survey program processing techniques and test results*. In: Proceedings of the First International Symposium on Precise positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, April 15-19, vol 1: 285-297, 1985.
- HATCH, R. *Dynamic differential GPS at the centimeter level*. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol 2: 1287-1298, 1986.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *Global positioning system: theory and practice*. Springer-Verlag/Wien, Fourth revised edition, 1994.
- LACHAPELLE, G.; HAGGLUND, J.; FALKENBERG, W.; BELLEMARE, P.; CASEY, M.; EATON, M. *GPS land kinematic positioning experiments*. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol 2: 1327-1344, 1986.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications*. Berlin: Walter de Gruyter, 1993.
- SEJAS, M. I. *Suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora – análise da técnica*. Curitiba, 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- SOARES, W. A. *Investigação de uma modelagem matemática como alternativa para aumento da área de cobertura de estações de referência DGPS*. Curitiba, 2005. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- WELLS, D. E.; BECK, N.; DELIKARAOGLU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANICEK, P. *Guide to GPS positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, N.B., Canada, 1986.

(Recebido em setembro de 2006. Aceito em março de 2007).