

5 Resultados da Simulação

5.1. Introdução

Neste capítulo, serão apresentados alguns aspectos da simulação e os resultados obtidos, bem como suas análises.

A simulação depende, primordialmente, das distribuições das estações de referência que formam o SBAS sobre o território brasileiro. Para analisar os efeitos desta distribuição, aeronaves foram situadas em posições de interesse e os erros verticais e horizontais de posicionamento foram calculados. Os períodos específicos foram selecionados com o objetivo de se obter uma análise em anos com características diferentes.

Os resultados serão apresentados por intermédio de tabelas e de gráficos de histogramas. A simulação que utiliza o modelo seccionalmente linear para o TEC da ionosfera determinou: (1) a quantidade de nós ativos da grade em cada passo da simulação; (2) o número de vezes em que cada nó da grade esteve ativo durante toda a simulação; e (3) as diferenças entre os retardos ionosféricos (obtidos por interpolação e calculados diretamente pelo modelo) nos nós da grade de interesse. Os resultados relativos às aeronaves mostram: (1) erros verticais e horizontais de posicionamento, sem e com correções derivadas do SBAS; (2) diferenças entre os retardos ionosféricos oblíquos (obtidos por interpolação a partir dos valores nos nós da grade e calculados diretamente pelo modelo); e (3) número de visadas entre aeronaves e satélites cujas pseudodistâncias foram corrigidas pelo sistema (com as configurações de redes propostas).

5.2. Simulação

A simulação foi realizada para os meses de janeiro e julho dos anos de 1996 e 2002, destacando assim os períodos onde a atividade solar era máxima (2002) e mínima (1996) e os solstícios de verão e inverno, respectivamente. Desta forma, foi possível avaliar os erros com máxima e mínima concentração

de elétrons, que proporcionam um retardo ionosférico maior ou menor, respectivamente. O intervalo de tempo utilizado entre dois passos da simulação foi de 10 minutos. Todas as simulações tiveram início no primeiro dia do mês analisado e completaram 30 dias, totalizando 4321 passos de simulação.

A cada passo da simulação, foram realizados, seqüencialmente, os seguintes procedimentos: (1) atualização das posições dos satélites; (2) determinação dos pontos de penetração dos raios formados pelas estações de referência e pelos satélites e dos retardos oblíquos e verticais correspondentes; (3) determinação dos retardos verticais nos nós da grade, por interpolação e diretamente a partir do modelo de ionosfera; (4) utilizando os dados da grade definida, determinação dos retardos verticais e oblíquos nos raios formados pelas aeronaves e pelos satélites, por interpolação e diretamente a partir do modelo de ionosfera; e (5) determinação dos erros verticais e horizontais de posicionamento das aeronaves, sem e com correções derivadas do SBAS.

A tabela 5.1 e a figura 5.1 mostram a distribuição das 15 estações que constituem a primeira rede de estações de referência, que coincidem com as estações receptoras de GPS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico (IBGE) [24], com suas respectivas localidades (latitude, longitude e altura). A segunda rede de estações de referência é obtida somando as estações presentes na tabela 5.2 às estações da tabela 5.1, aumentando o número de estações de 15 para 29. O conjunto total de estações de referência da segunda rede está apresentado na figura 5.2. Estas novas estações irão suprir as localidades não cobertas pela primeira rede e servirão para verificar o impacto da adição de mais uma estação nas regiões onde já existia uma boa cobertura.

Localização das Estações de Referência			
Cidades	Latitude	Longitude	Altitude(m)
B J da Lapa\BA	-13°15'18.4236"	-43°25'16.8024"	437.871
Brasília\DF	-15°56'49.2964"	-47°52'38.7376"	1118.6531
Crato\CE	-07°14'15.4144"	-39°24'54.8826"	462.335
Cuiabá\MT	-15°33'17.4029"	-56°04'09.7174"	243.523
Curitiba\PR	-25°26'52.3651"	-49°13'49.7012"	928.682
Fortaleza\CE	-03°52'37.4397"	-38°25'30.9494"	49.584
Imperatriz\MA	-05°29'28.9729"	-47°29'48.5164"	126.5223
Manaus\AM	-03°06'13.0000"	-60°01' 30.0000"	100.0
Porto Alegre\RS	-29°43'06.3725"	-53°42'57.8008"	108.630
P Prudente\SP	-22°07'09.9678"	-51°24'28.9709"	435.424
Recife\PE	-08°03'01.98127"	-34°07'04.30178"	1118.6531
Rio de Janeiro\RJ	-22°49'02.4574"	-43°18'21.0747"	18.512
Salvador\BA	-13°00'29.6051"	-38°30'43.2010"	57.893
Santa Maria\RS	-30°04'24.7580"	-51°07'09.2863"	73.9071
Viçosa\MG	-20°45'39.6537"	-42°52'10.4763"	678.083

Tabela 5.1 – Distribuição das estações de referência da primeira rede.

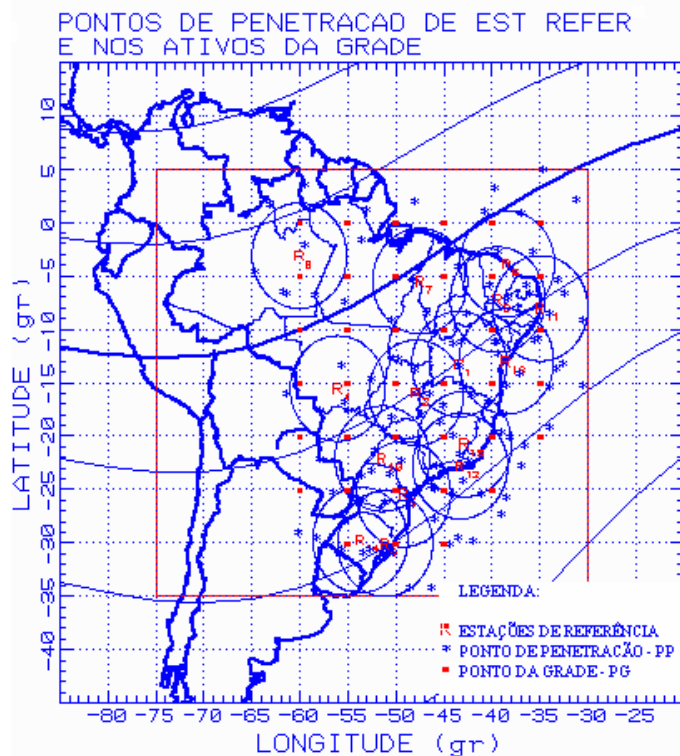


Figura 5.1 – Rede com 15 estações de referência, com pontos de penetração.

Localização das Estações de Referência			
Cidades	Latitude	Longitude	Altitude(m)
Alcântara\MA	-02°24'32.0000"	-44°24'53.0000"	32.0
Boa Vista\RR	02°49'11.0000"	-60°40'24.0000"	85.0
Cachimbo\PA	-09°28'00.0000"	-54°50'00.0000"	260.0
Feijó\AC	-08°09'51.0000"	-70°21'13.0000"	153.0
Fonte Boa\AM	-02°30'50.00000"	-66°05' 30.0000"	62.0
Jataí\GO	-17°52'53.0000'	-51°42'52.000"	696.0
Macapá\AP	00°02'20.0000"	-51°03'59.0000"	16.0
Óbidos\PA	-01°55'03.0000"	-55°31'05.0000"	45.0
Patos de Minas\MG	-18°34'44.0000"	-46°31'05.0000"	832.0
Porto Murtinho\MS	-21°41'56.0000"	-57°52'57.0000"	90.0
Porto Nacional\TO	-10°42'29.0000"	-48°25'02.0000"	212.0
Porto Velho\RO	-08°45'43.0000"	-63°54'14.0000"	85.0
S R Nonato\CE	-09°00'55.0000"	-42°41'58.0000"	332.0
Vilhena\RO	-12°44'26.0000"	-60°08'45.0000"	600.0

Tabela 5.2 – Distribuição das estações de referência adicionais.

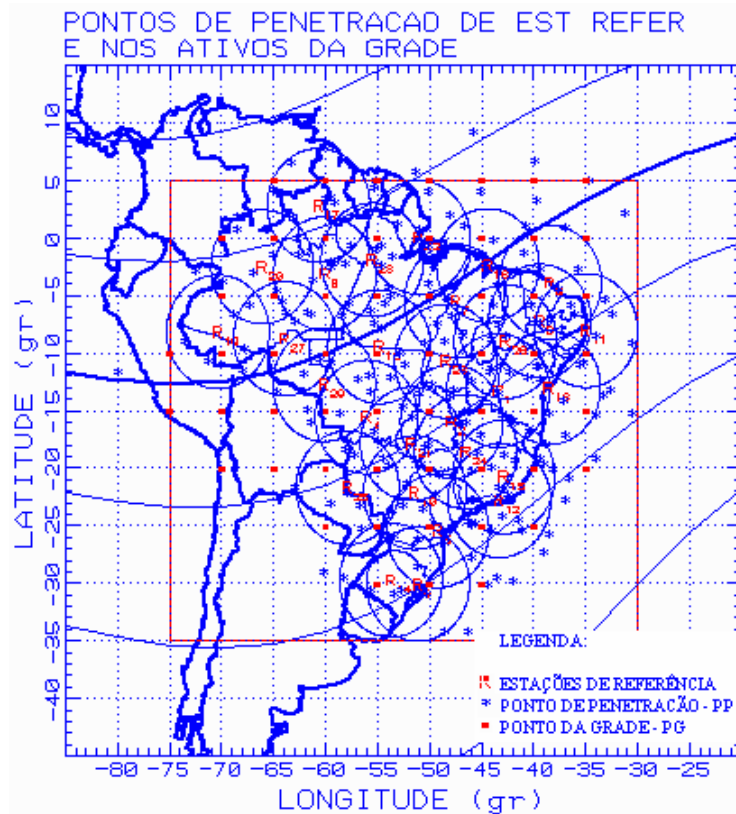


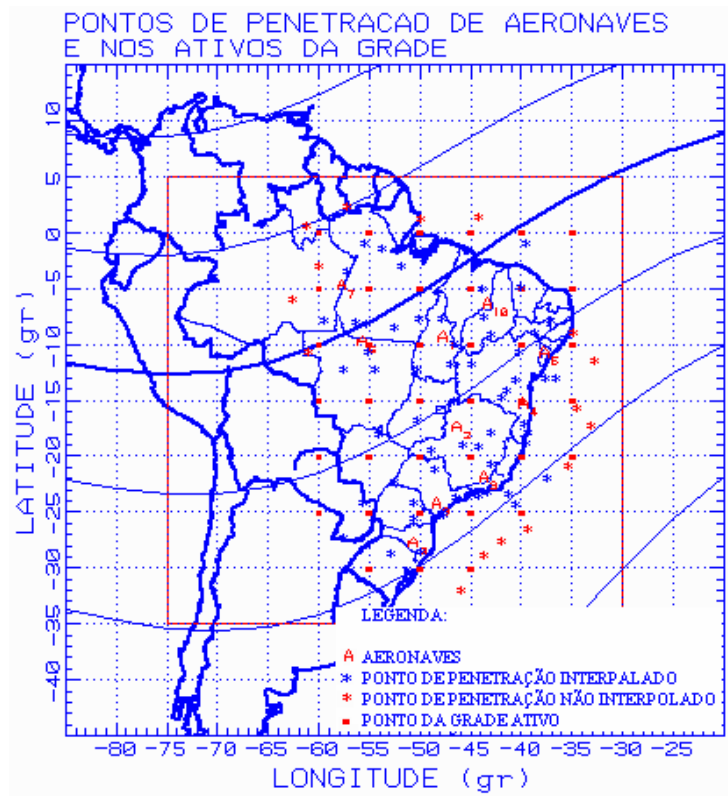
Figura 5.2 – Rede com 29 estações de referência, com pontos de penetração.

A configuração inicial da constelação de satélites utilizada foi mostrada na tabela 4.1 do capítulo anterior, sendo atualizada para a data inicial e para cada passo da simulação.

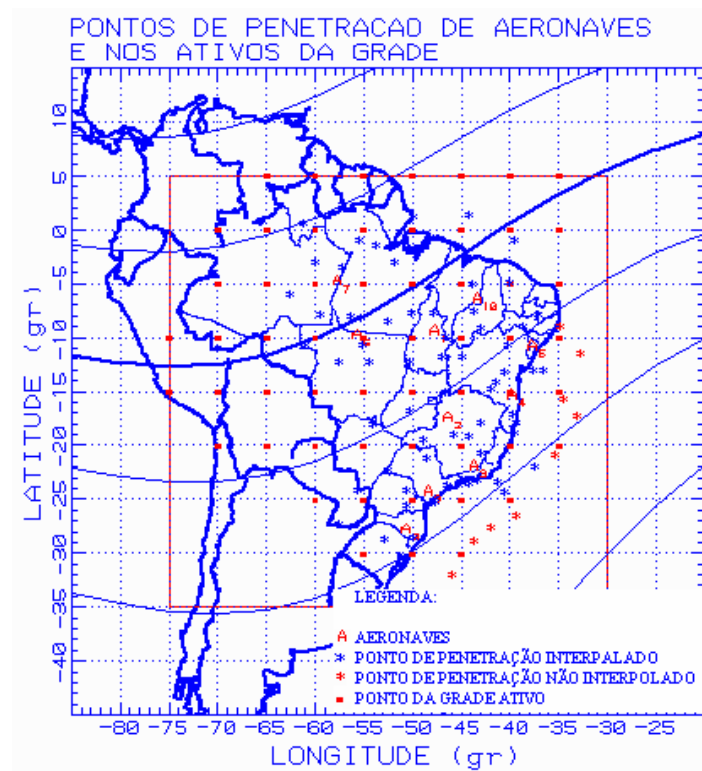
As posições das aeronaves foram selecionadas para se verificar o impacto causado pelo SBAS. Estas posições podem ser vistas na tabela 5.3 e na figura 5.3.

Posições das Aeronaves			
Eixo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (km)
Belém – Brasília	-09°15'0.0000"	-47°42'0.0000"	10.0
Brasília – Belo Horizonte	-17°20'0.0000"	-46°20'0.0000"	10.0
Belo Horizonte – Rio	-21°50'0.0000"	-43°40'0.0000"	10.0
Rio – Salvador	-15°15'0.0000"	-39°45'0.0000"	10.0
Salvador – Recife	-10°40'0.0000"	-37°40'0.0000"	10.0
Brasília – Manaus1	-09°40'0.0000"	-55°40'0.0000"	10.0
Brasília – Manaus2	-04°40'0.0000"	-57°40'0.0000"	10.0
São Paulo – Curitiba	-24°10'0.0000"	-48° 20'0.0000"	10.0
Curitiba – Porto Alegre	-27°40'0.0000"	-50°40'0.0000"	10.0
Fortaleza – Brasília	-06°20'0.0000"	-43°20'0.0000"	10.0

Tabela 5.3 - Localização das aeronaves.



(a)



(b)

Figura 5.3 – Posicionamento das aeronaves, com pontos de penetração: (a) rede de 15 estações de referência; (b) rede de 29 estações de referência.

A grade formada sobre o território brasileiro com o intuito de corrigir o retardo causado pela ionosfera é compreendida entre as latitudes 35° Sul e 5° Norte e as longitudes 75° Oeste e 35° Oeste. As alturas dos pontos de penetração foram supostas iguais a 350 km. As figuras 5.1 e 5.2 representam a grade e mostram os pontos de penetração (asteriscos azuis) dos raios formados pelas estações de referência e pelos satélites para as redes com 15 estações e 29 estações, respectivamente. Mostram, ainda, os nós ativos da grade (quadrados vermelhos), cujos retardos foram obtidos por interpolação a partir dos dados correspondentes aos pontos de penetração. A figura 5.3 mostra a mesma grade e a mesma coleção de nós ativos da grade (quadrados vermelhos) observada na figura 5.1, juntamente com os pontos de penetração (asteriscos azuis ou vermelhos, para pseudo-distâncias corrigidas ou não, respectivamente) dos raios formados pelas aeronaves e pelos satélites.

O modelo ionosférico utilizado, descrito resumidamente no capítulo anterior, requer dados de entradas que variam com o tempo. Entre estes, encontram-se índices que representam a atividade magnética e a atividade solar. As variações no tempo do índice F10.7, utilizado nesta dissertação para representar a atividade solar, podem ser vistas na figura 2.4. Os valores observados nesta figura resultam de média móvel de 27 dias aplicada aos valores diários do mesmo índice. Adicionalmente, como resultado de consulta ao responsável pelo desenvolvimento do PIM [25], o valor do índice F10.7 fornecido ao modelo foi limitado ao valor máximo de 210. As variações no tempo do índice Kp, utilizado nesta dissertação para representar a atividade magnética, podem ser vistas nas figuras 5.4(a) e 5.4(b) para os meses de janeiro (1996-2002) e julho (1996-2002), respectivamente. Este índice é medido a cada 3 horas. A tabela 5.4 mostra a média mensal dos índices F10.7 e Kp.

MÉDIA MENSAL DOS ÍNDICES F10.7 E Kp		
MÊS	F10.7	Kp
JANEIRO - 1996	73.8	1.86
JANEIRO - 2002	230.9	1.76
JULHO - 1996	71.3	1.56
JULHO - 2002	168.2	2.22

Tabela 5.4 – Média mensal dos índices F10.7 e Kp.

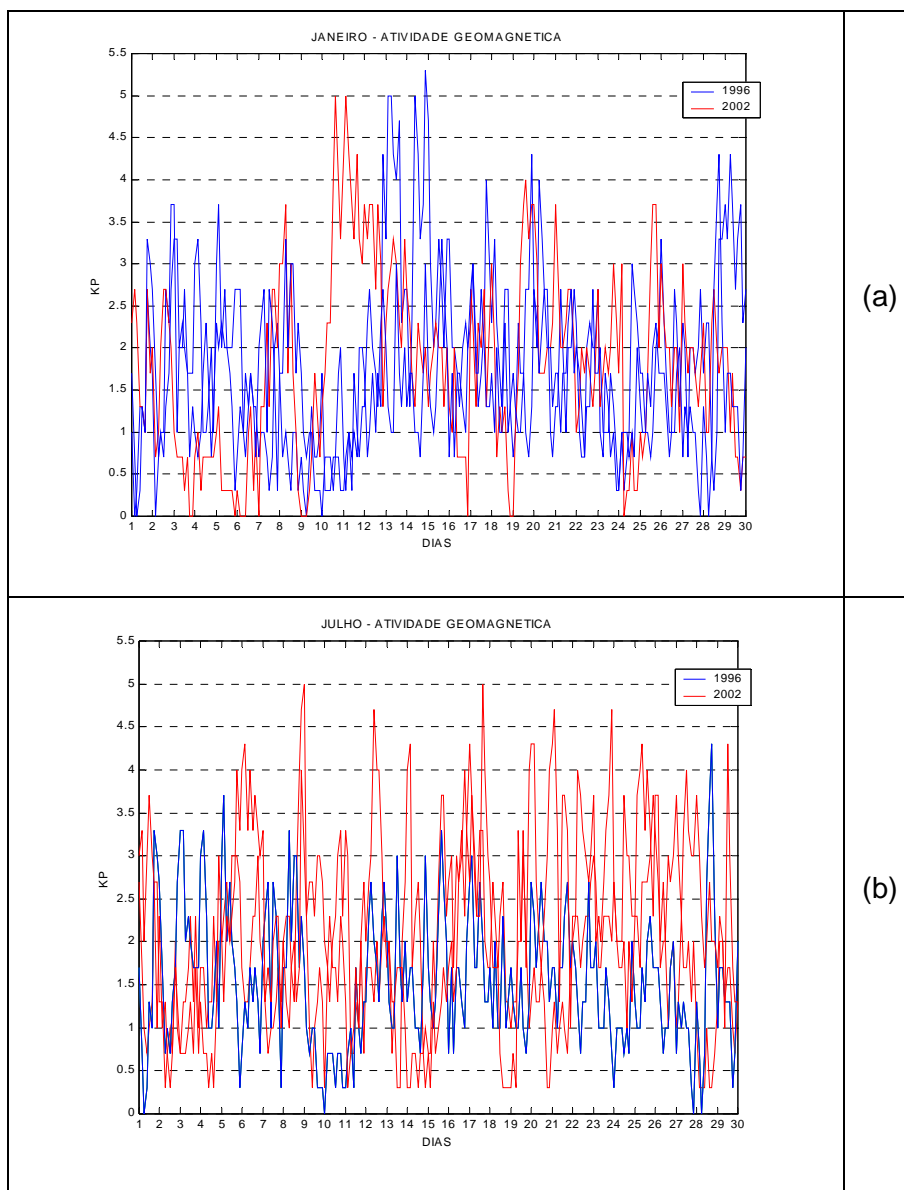


Figura 5.4 – Variação do índice Kp que indica a atividade magnética: (a) solstício de verão (janeiro) (1996-2002) e (b) solstício de inverno (julho) (1996)-(2002).

5.3. Resultados

5.3.1. Modelo Seccionalmente Linear

Os primeiros resultados a serem discutidos estão mostrados nas figuras 5.5 e 5.6, correspondentes às redes com 15 e 29 estações de referência, respectivamente. Estas figuras mostram os números de vezes em que os nós da grade estiveram ativos durante todo o período da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996. Observa-se que os nós da grade situados no interior da região compreendida entre as longitudes de 55°O a 35°O e entre as latitudes de 10°S a 20°S estiveram ativos durante todo o tempo para ambas configurações de rede. Isto se deve à maior concentração de estações no interior desta região. Uma comparação entre os resultados apresentados nas figuras 5.5 e 5.6 mostra que a utilização da rede com 29 estações de referência permitiu um aumento do número de vezes em que determinados nós da grade estiveram ativos durante todo o período da simulação. Este aumento foi particularmente dramático para os nós cujas latitudes estão compreendidas entre 75°O e 65°O .

As figuras 5.7(a) e 5.7(b) mostram os histogramas do número de nós ativos em cada passo da simulação correspondente a janeiro de 1996, para as redes com 15 e 29 estações de referência, respectivamente. Observa-se que a rede de 29 estações de referência permitiu o aumento da média do número de nós ativos em cada passo da simulação de 45.65 (correspondente à rede de 15 estações de referência) para 60.25.

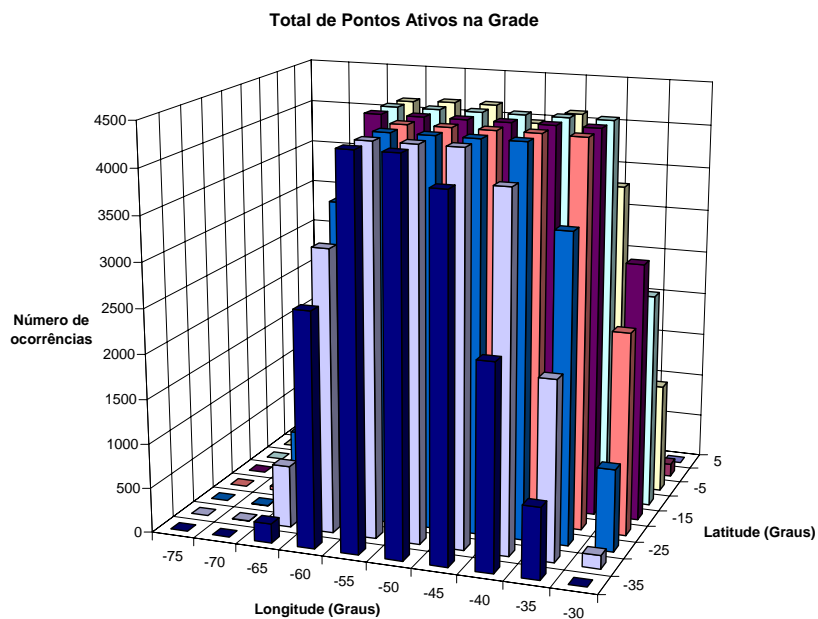
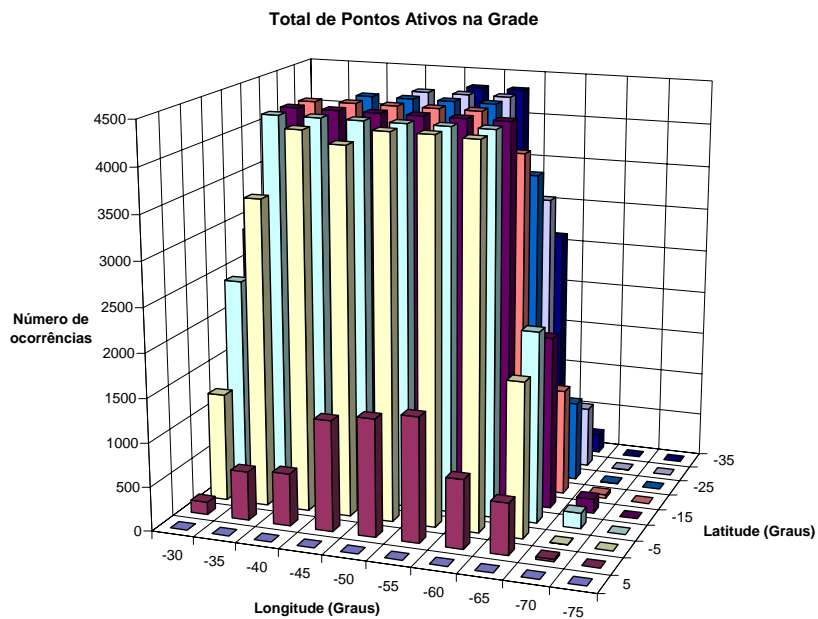


Figura 5.5 – Números de vezes em que os nós da grade estiveram ativos durante todo o período da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996 para a rede de 15 estações de referência: (a) vista frontal; e (b) vista posterior.

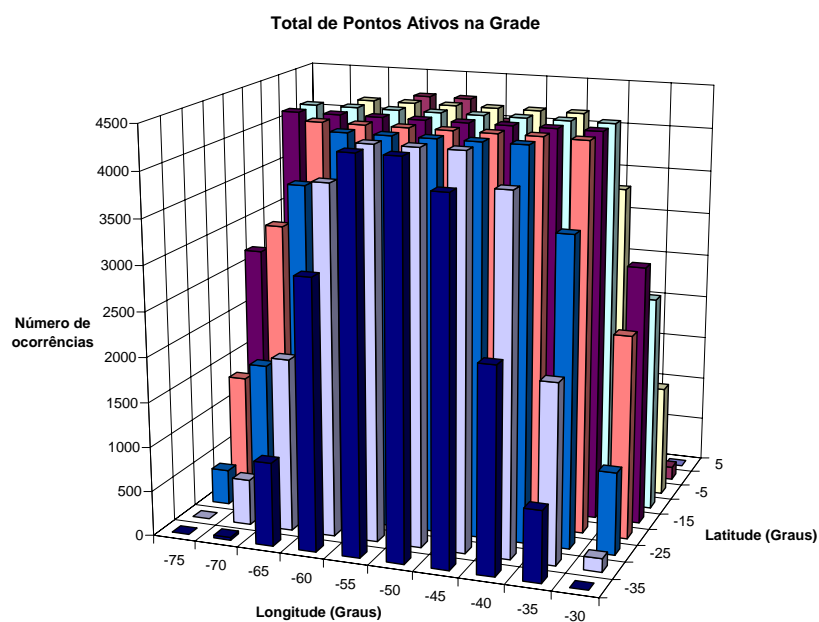
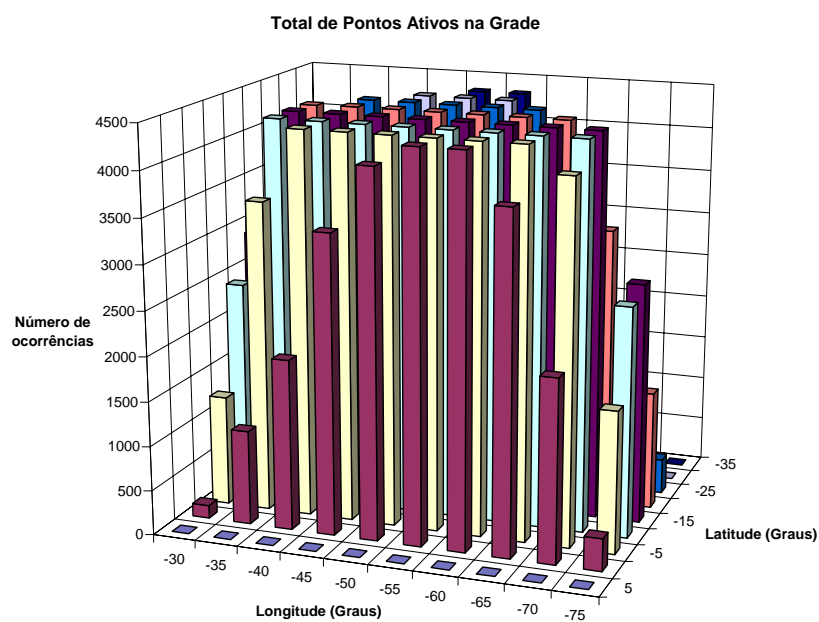
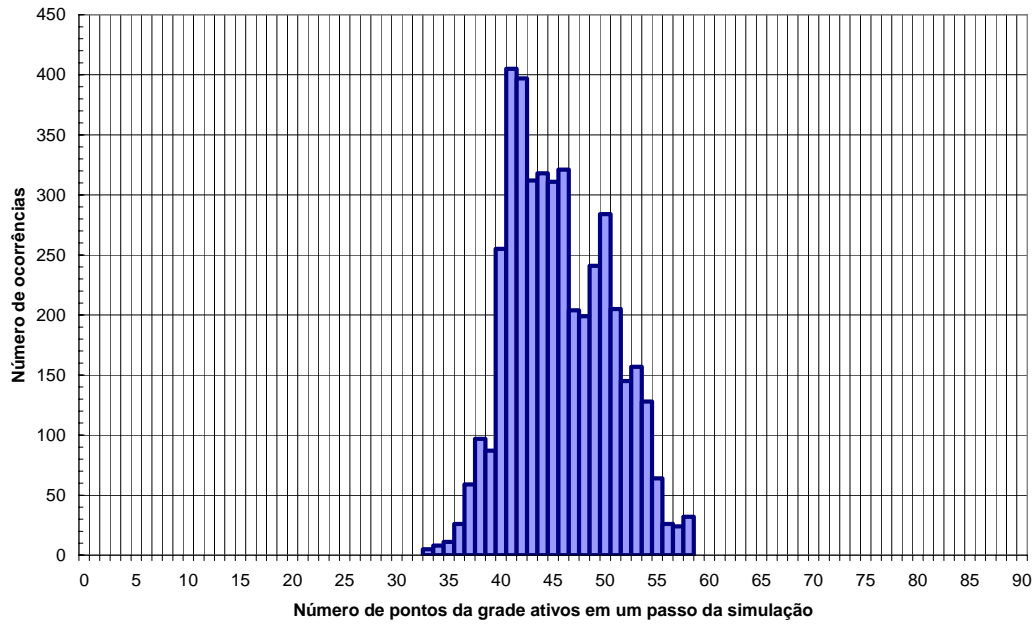
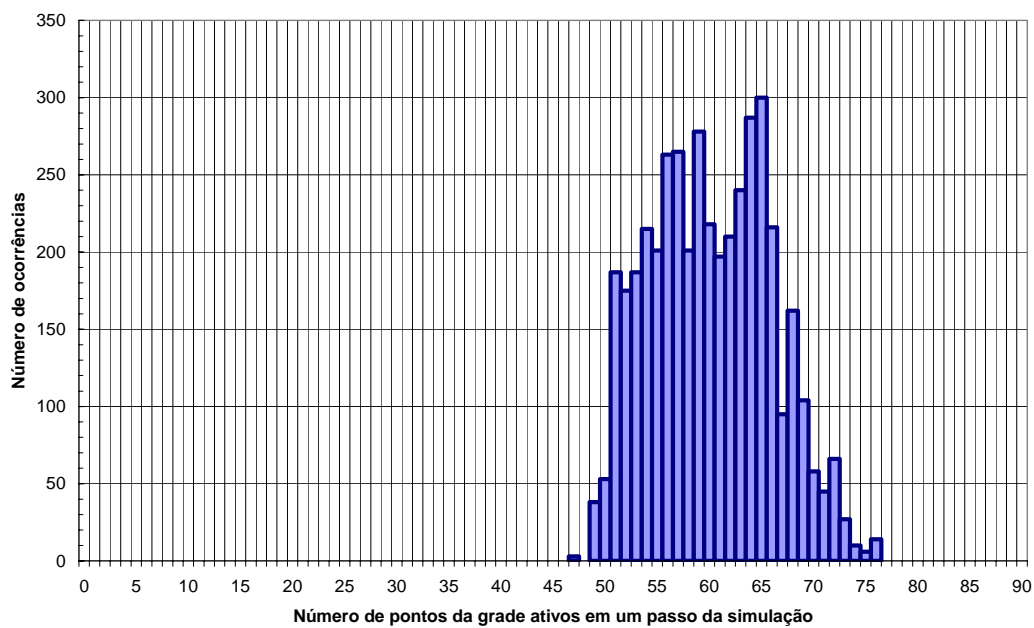


Figura 5.6 – Números de vezes em que os nós da grade estiveram ativos durante todo o período da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996 para a rede de 29 estações de referência: (a) vista frontal; e (b) vista posterior.



(a)

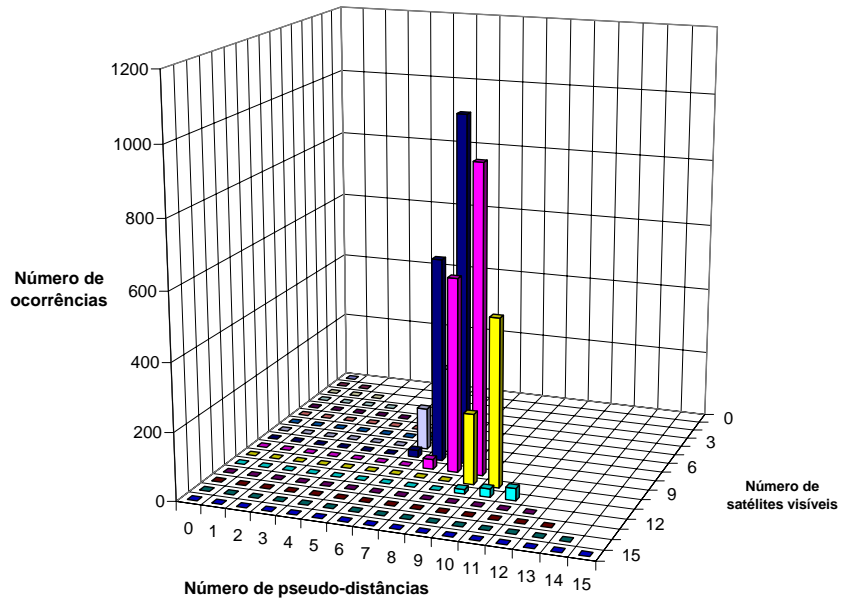


(b)

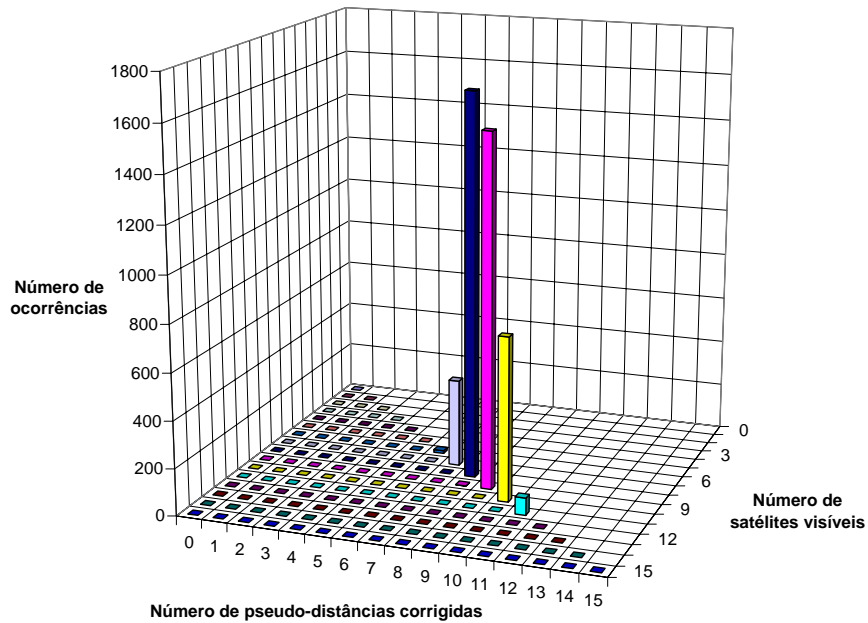
Figura 5.7 – Histogramas do número de nós ativos em cada passo da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

As figuras 5.5 a 5.7 mostram que, com o aumento do número de estações de referência da rede, foi possível cobrir uma região maior e com um tempo maior de cobertura. Este fato pode também ser comprovado pelos resultados apresentados nas figuras 5.8(a) e 5.8(b). Estas figuras apresentam os histogramas bidimensionais do número de satélites visíveis pela aeronave 1 e do número de pseudodistâncias correspondentes corrigidas por intermédio de interpolação. Os resultados apresentados referem-se à simulação relativa ao solstício de verão (janeiro) de 1996, para as redes de 15 e de 29 estações de referência, respectivamente. A posição da aeronave 1, localizada na rota Belém – Brasília, está apresentada na tabela 5.3. O número de satélites visíveis pela aeronave 1 variou entre 7 e 11. Entretanto, foram fortemente predominantes as ocorrências de 8 e 9 satélites visíveis. Observa-se que a rede de 29 estações de referência conseguiu corrigir as pseudodistâncias relativas a todos os raios formados pela aeronave 1 e pelos satélites visíveis por intermédio de interpolação com base nos valores dos nós da grade. Por outro lado, isto não foi possível quando a rede de 15 estações de referência foi utilizada.

Resultados dos tipos apresentados nas figuras 5.5 a 5.8 foram obtidos para os demais períodos simulados (julho de 1996, janeiro de 2002 e julho de 2002). Entretanto, devido à grande semelhança entre eles e os correspondentes a janeiro de 1996, não serão mostrados.



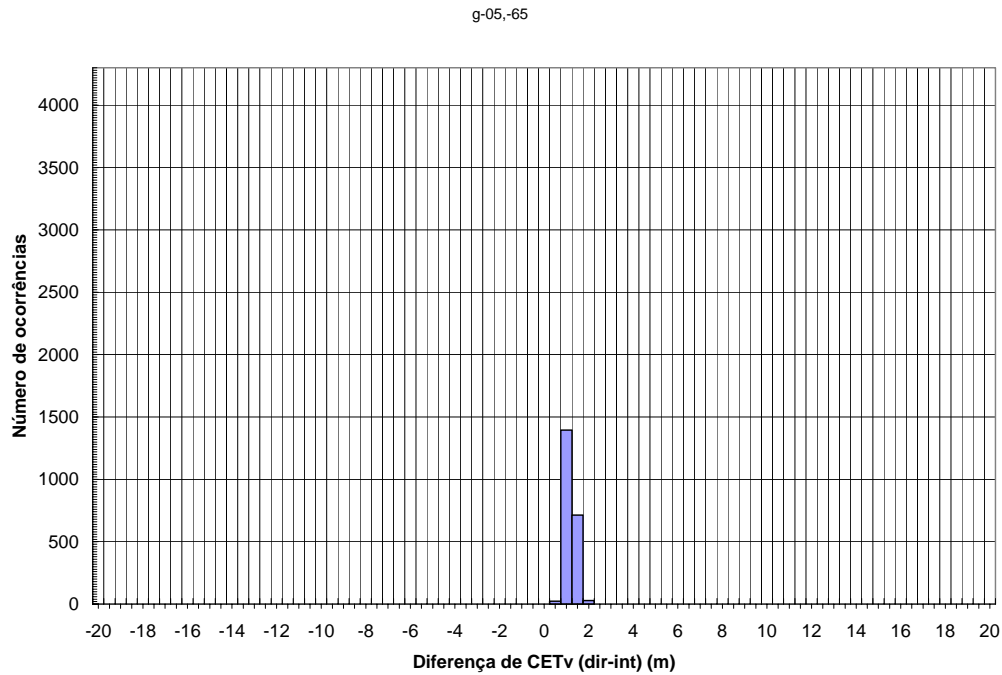
(a)



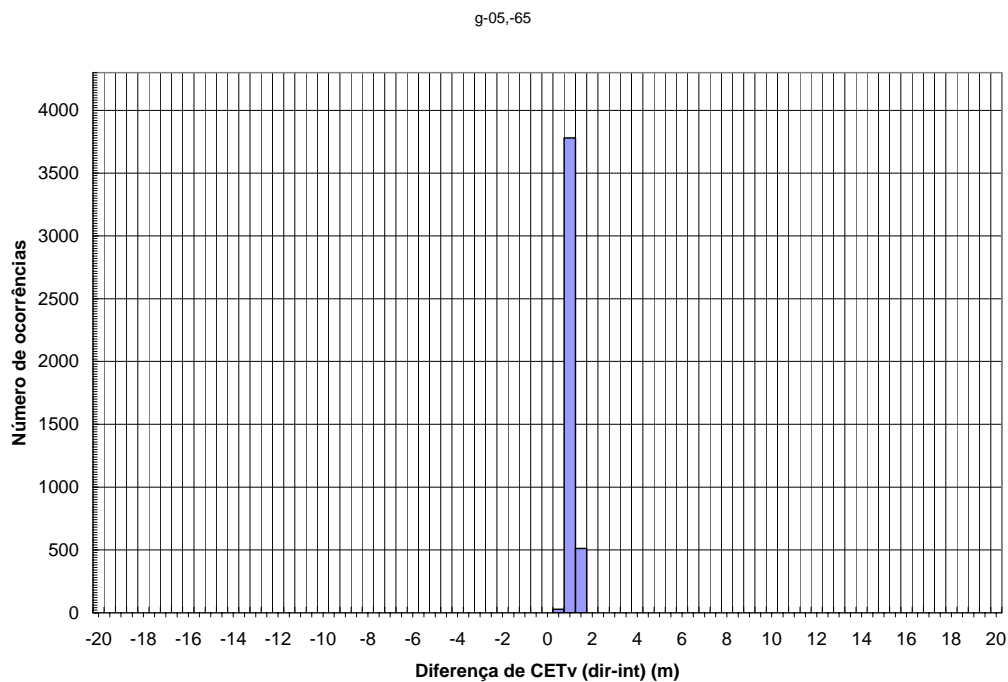
(b)

Figura 5.8 – Histogramas bidimensionais do número de satélites visíveis pela aeronave 1 ($09^{\circ}15'S$, $47^{\circ}42'O$, altitude de 10km) e do número de pseudodistâncias correspondentes corrigidas por intermédio de interpolação, para a simulação relativa ao solstício de verão (janeiro) de 1996, considerando: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

Em seguida, foram observados os efeitos das duas redes de estações de referência no retardo vertical nos nós da grade. Para tanto, foi necessário determinar a diferença entre o retardo ionosférico vertical resultante da interpolação com base nos dados correspondentes aos pontos de penetração dos raios entre as estações de referência e os satélites e o retardo vertical calculado diretamente a partir do modelo para a ionosfera. Foram selecionados para observação os dados correspondentes a três nós da grade: (1) de coordenadas 05°S, 60°O, próximo a Manaus; (2) de coordenadas 20°S, 45°O situado na região Sudeste, onde se concentrou o maior número de nós ativos durante a simulação; e (3) de coordenadas 25°S, 55°O, situado na região Sul. Observa-se nas figuras 5.1 e 5.2 que o número de estações de referência situadas nas proximidades dos nós selecionados é maior quando se considera a rede de 29 estações (notadamente no caso do nó situado nas proximidades de Manaus). Os resultados correspondentes aos três nós selecionados estão apresentados nas figuras 5.9 a 5.11, respectivamente.

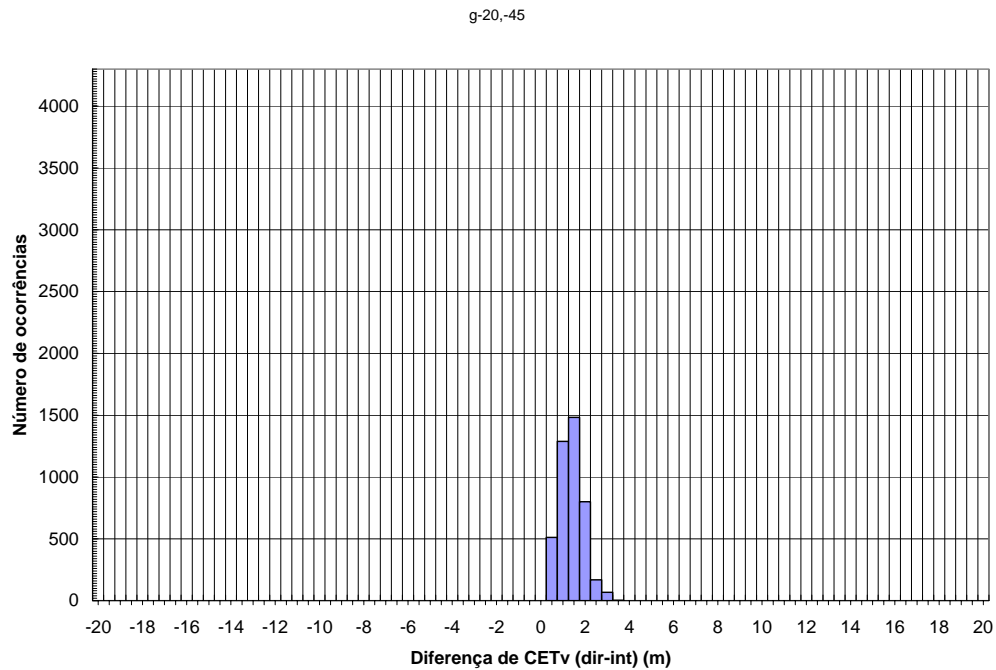


(a)

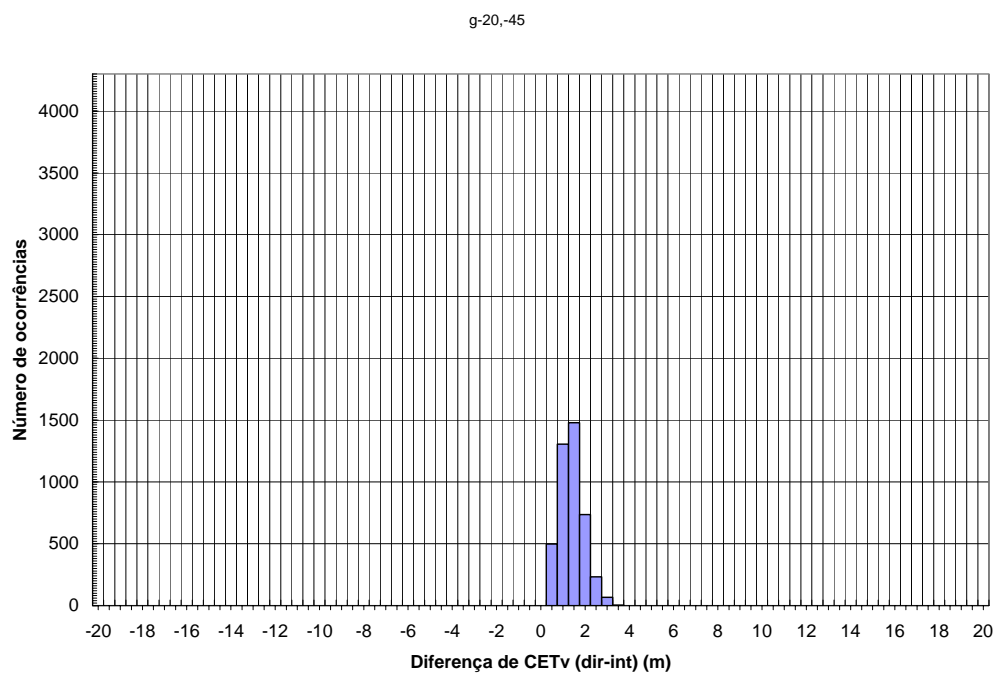


(b)

Figura 5.9 – Histogramas da diferença entre os retardos verticais obtidos diretamente a partir do modelo para a ionosfera e por interpolação no nó da grade de coordenadas 05°S, 65°O para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

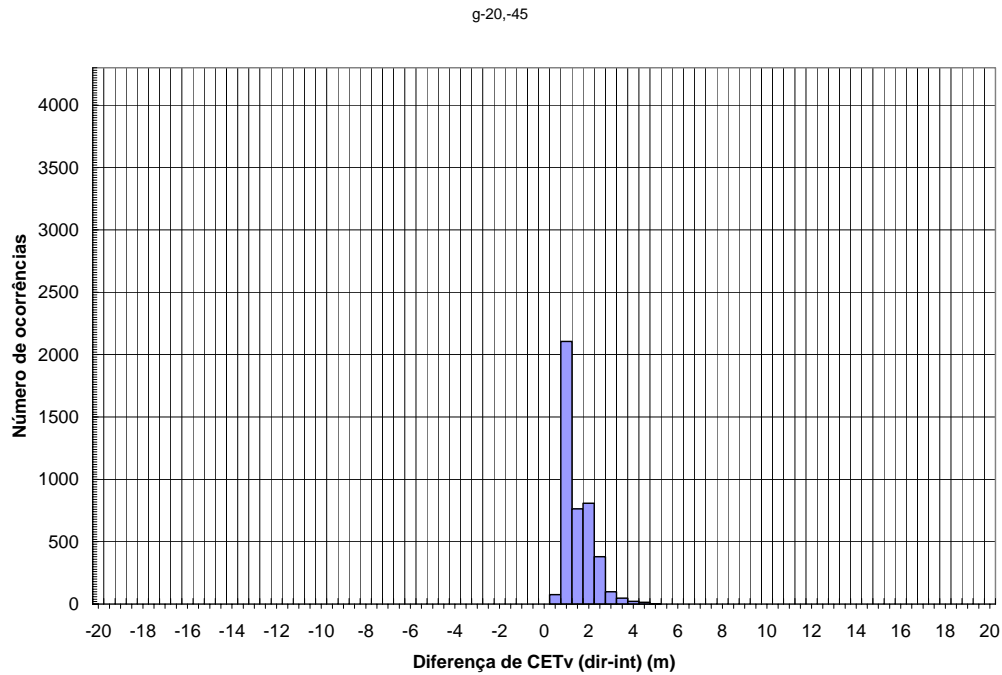


(a)

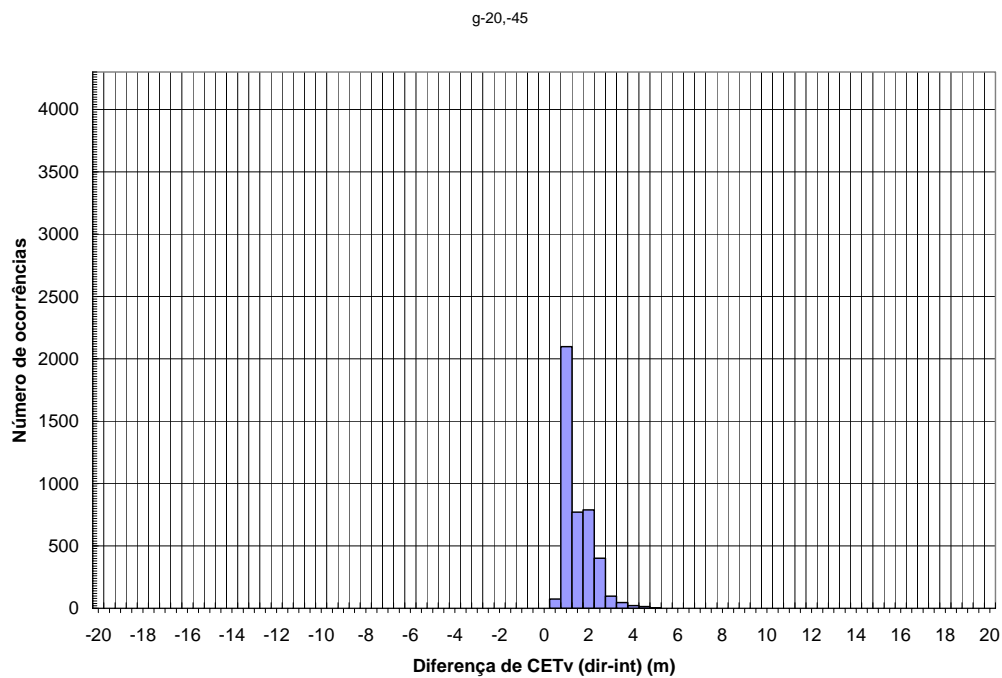


(b)

Figura 5.10 – Histogramas da diferença entre os retardos verticais obtidos diretamente a partir do modelo para a ionosfera e por interpolação no nó da grade de coordenadas 20°S, 45°O para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.



(a)



(b)

Figura 5.11 – Histogramas da diferença entre os retardos verticais obtidos diretamente a partir do modelo para a ionosfera e por interpolação no nó da grade de coordenadas 25°S, 55°O para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

Comparando-se as figuras 5.9(a) e 5.9(b) (correspondente ao nó situado nas coordenadas 05°S, 65°O), percebe-se que o acréscimo de estações de referência na região Norte produziu um grande aumento no número de vezes em que o retardo vertical foi obtido por interpolação. Este acréscimo permitiu que o nó permanecesse ativo durante todos os passos da simulação relativa ao solstício de inverno (julho) de 1996. Entretanto, para a rede de 15 estações de referência, o mesmo nó permaneceu ativo durante apenas 41% dos passos de simulação. Estas observações são consistentes com os resultados apresentados nas figuras 5.1 e 5.2. Por outro lado, o acréscimo de estações de referência não teve efeito significativo nos valores da diferença entre os retardos obtidos diretamente e por interpolação.

As figuras 5.10 (nó situado nas coordenadas 20°S, 45°O) e 5.11 (nó situado nas coordenadas 25°S, 55°O), por sua vez, não mostram diferenças visualmente significativas entre os resultados correspondentes às duas redes de estações de referência. Deve-se lembrar que os resultados apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 indicam que os dois nós estiveram ativos durante todo o tempo de simulação para ambas as redes. Estas observações indicam que o acréscimo de estações em regiões com cobertura adequada e a manutenção do algoritmo de interpolação utilizado não foram capazes de diminuir a diferença entre os retardos obtidos diretamente e por interpolação em nós situados nestas regiões.

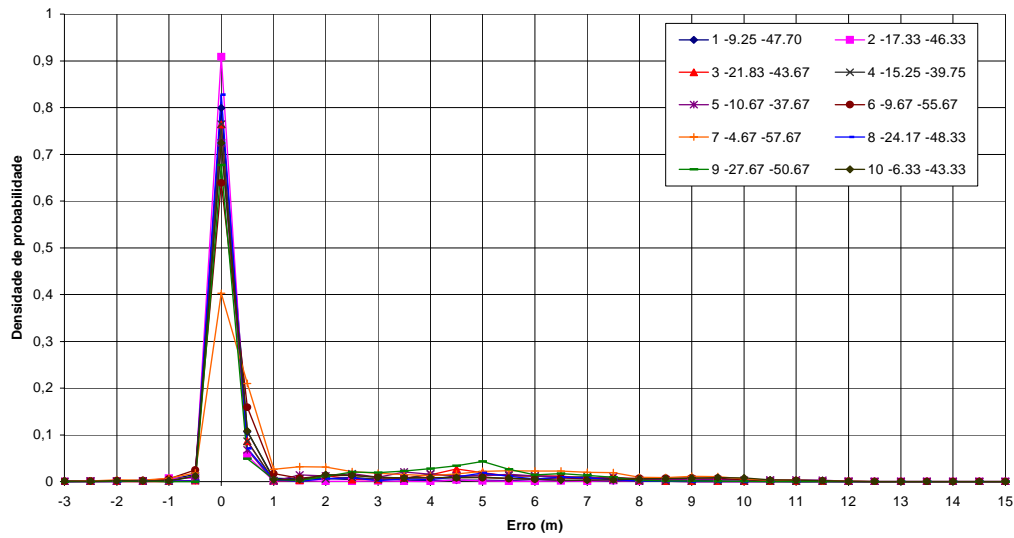
De acordo com as figuras 5.9 a 5.11, para ambas as redes de estações de referência, os valores da diferença entre os retardos obtidos diretamente e por interpolação se distribuíram nos seguintes intervalos: (1) entre 0.5 m e 1.5 m, para o nó situado nas coordenadas geográficas 05°S, 65°O; (2) entre 0.5 m e 3.0 m, para o nó situado nas coordenadas geográficas 20°S, 45°O; e (3) entre 0.5 m e 4.5 m, para o nó situado nas coordenadas geográficas 25°S, 55°O. Observa-se que o intervalo de variação da diferença entre os retardos obtidos diretamente e por interpolação correspondente ao primeiro nó (situado nas proximidades de Manaus) é significativamente mais estreito que os dos demais. As latitudes geomagnéticas dos nós são respectivamente, iguais a 06°N, 15°S e 15°S. O primeiro nó encontra-se nas proximidades do equador geomagnético, enquanto que os demais se encontram na região fortemente influenciada pela anomalia equatorial. Os valores relativos das larguras dos intervalos apresentados acima são consistentes com os efeitos esperados da anomalia equatorial. Isto é, os gradientes mais intensos nos valores do TEC vertical existentes nesta região aumentariam os erros nos valores de retardo obtidos por interpolação.

5.3.2. Erros Verticais e Horizontais nas Posições das Aeronaves

As figuras 5.12 a 5.15 apresentam histogramas da diferença entre os retardos calculados diretamente pelo modelo da ionosfera e os retardos interpolados a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível. Estes histogramas foram obtidos para todas as aeronaves da tabela 5.3 para os solstícios de verão e inverno (meses de janeiro e julho, respectivamente) dos anos de 1996 e 2002, para as redes formadas pelas 15 e 29 estações de referência das tabelas 5.1 e 5.2.

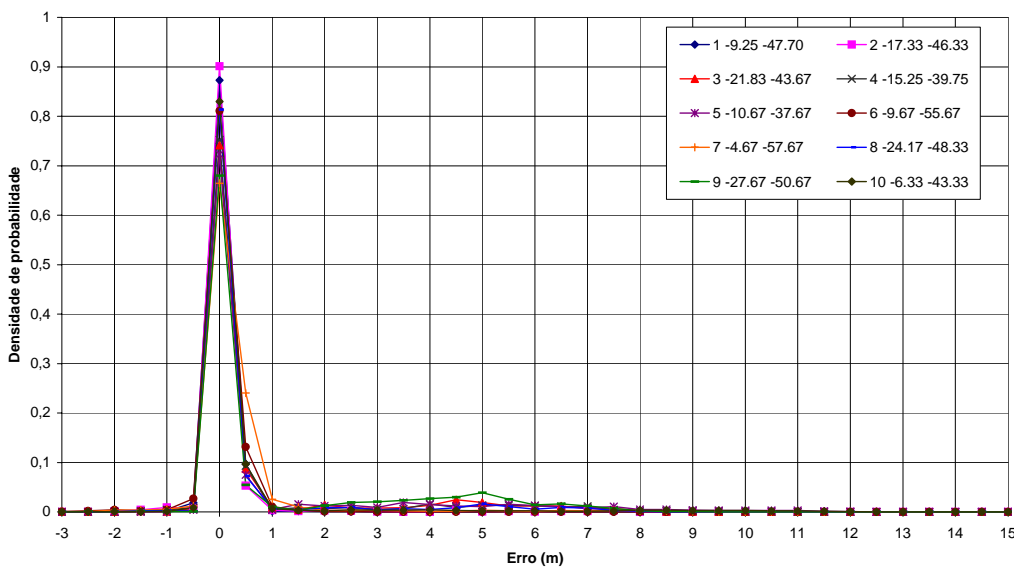
Os resultados mostram que, com poucas exceções, os histogramas relativos à rede de 15 estações de referência são muito semelhantes aos seus correspondentes relativos à rede de 29 estações de referência. Para os solstícios de verão e inverno (meses de janeiro e julho, respectivamente) de 1996 (ano de mínima atividade solar), as diferenças de retardo nos raios oblíquos correspondentes aos pontos de penetração das aeronaves se concentram, essencialmente, no intervalo compreendido entre -0.5 m e 1.0 m. Entretanto, existem exemplos de variações mais amplas, que podem atingir valores elevados (5.0 m ou mais), mesmo nos resultados relativos ao solstício de inverno (julho) de 1996. Por outro lado, para os solstícios de verão e inverno (meses de janeiro e julho, respectivamente) de 2002 (ano de máxima atividade solar), as diferenças de retardo nos raios oblíquos correspondentes aos pontos de penetração das aeronaves se distribuem, essencialmente, no intervalo compreendido entre -3.0 m e 3.0 m. Adicionalmente, observam-se exemplos de valores elevados para as diferenças entre os retardos (da ordem de 15.0 m). Estes eventos ocorrem com probabilidades baixas. Entretanto, considerando os rigorosos critérios que devem ser atendidos pelo SBAS, estes eventos não podem ser desprezados.

Erro Cet- obluo (direto-interpolado)



(a)

Erro Cet- obluo (direto-interpolado)



(b)

Figura 5.12 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nos da grade no mesmo raio formado por aeronave e satelite visível, para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) rede de 15 estaoes de referência; e (b) rede de 29 estaoes de referência.

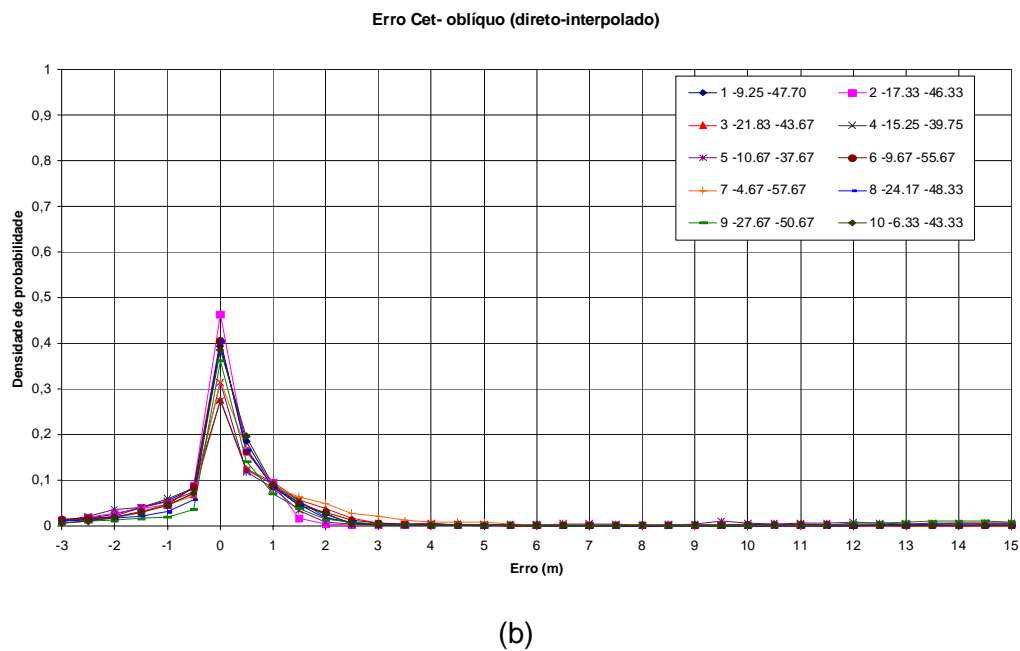
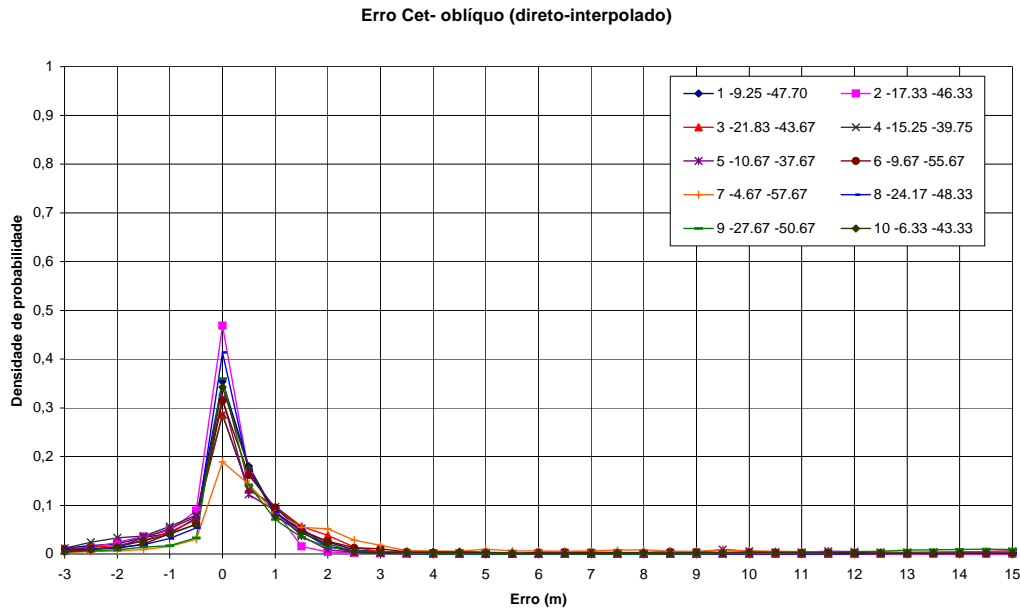


Figura 5.13 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

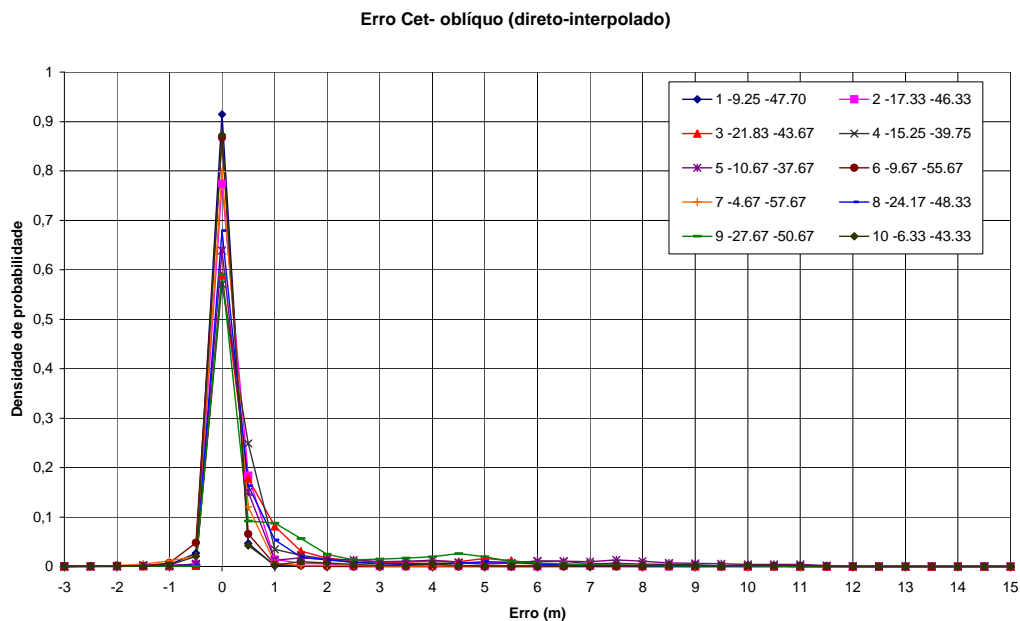
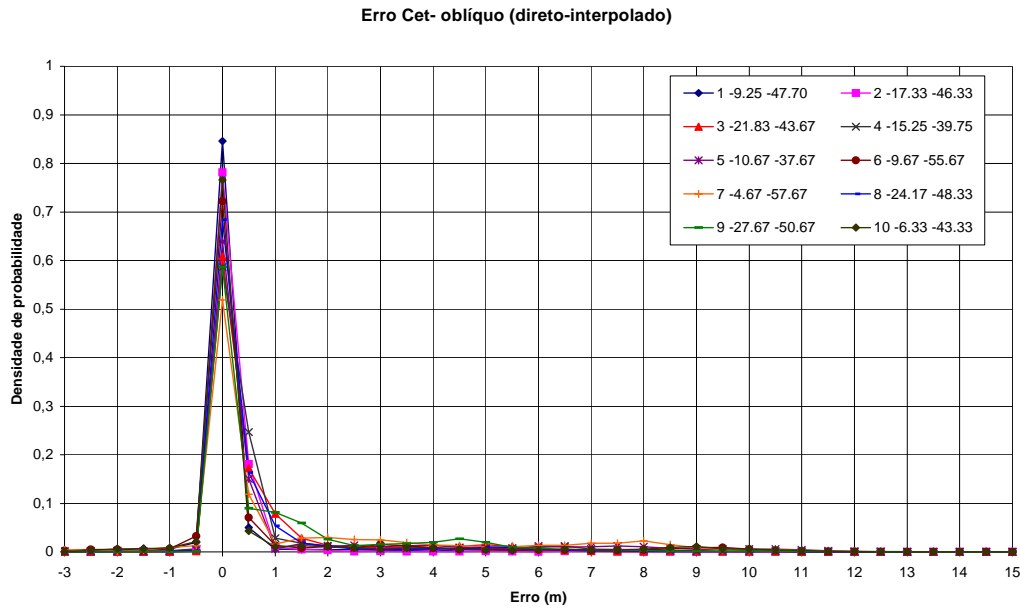
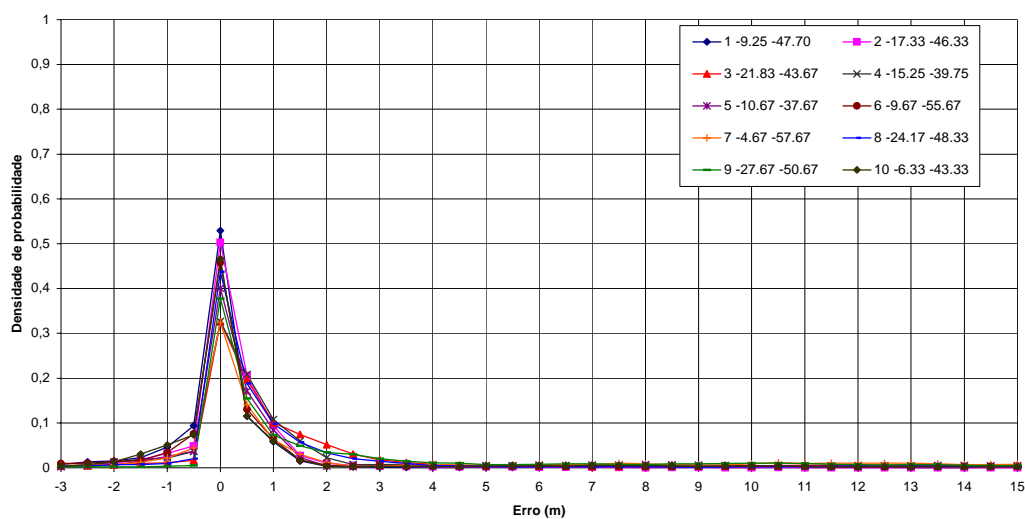


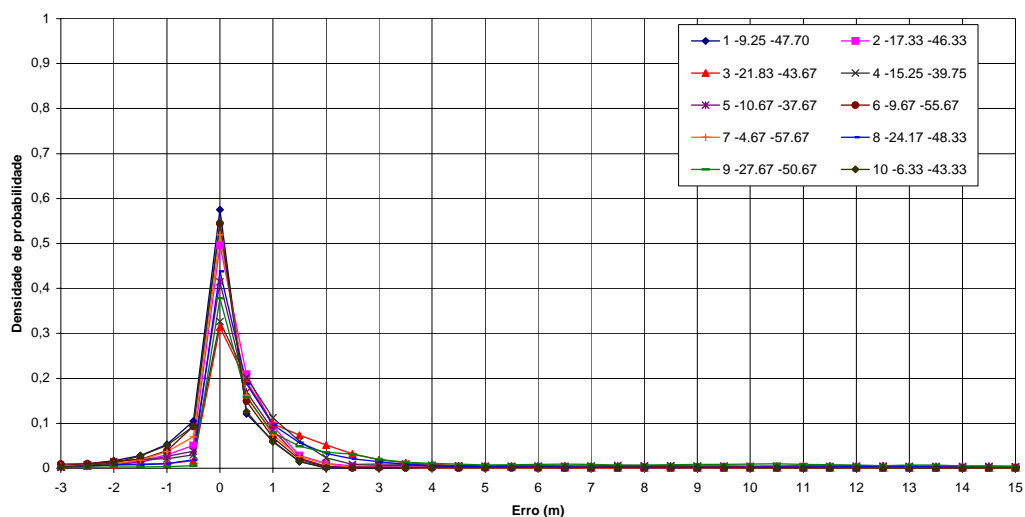
Figura 5.14 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de inverno (julho) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

Erro Cet- oblíquo (direto-interpolado)



(a)

Erro Cet- oblíquo (direto-interpolado)



(b)

Figura 5.15 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência.

O SBAS é projetado para diminuir os erros horizontal e vertical no posicionamento de aeronaves causados pelo retardo ionosférico (e por outras fontes de degradação). Para avaliar o desempenho do SBAS, foi necessário determinar estes erros, utilizando as informações da tabela 5.3, que simula posições de aeronaves no espaço aéreo brasileiro.

Os histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, estão apresentados nas figuras 5.16 a 5.19, para os quatro meses utilizados na simulação e para as duas configurações de rede de estações de referência.

Os histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, estão apresentados nas figuras 5.20 a 5.23, para os quatro meses utilizados na simulação e para as duas configurações de rede de estações de referência.

Para uma melhor análise dos erros horizontais e verticais, as médias e os valores de desvio padrão de todos os resultados apresentados nas figuras 5.16 a 5.23 foram determinados. Estas informações estão presentes nas tabelas 5.5, que mostra os valores correspondentes aos erros de posicionamento sem correção, e 5.6, que mostra os valores correspondentes aos erros de posicionamento com a correção do SBAS, para as duas configurações de rede de estações de referência.

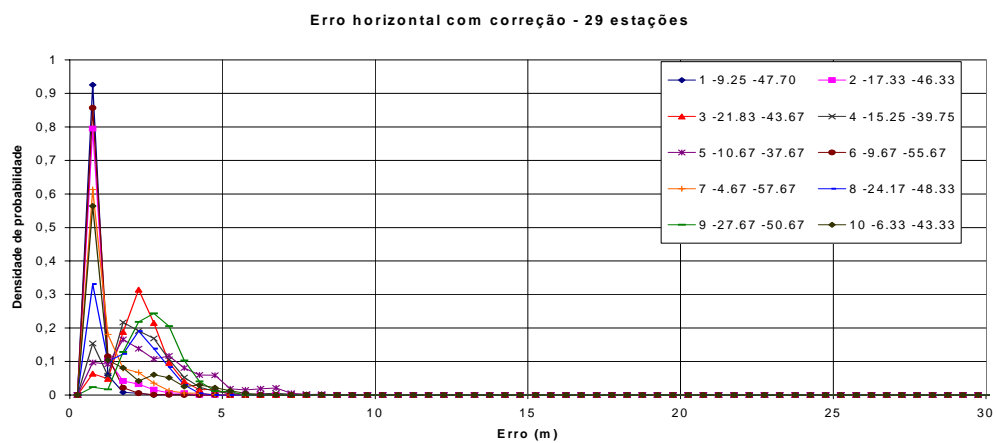
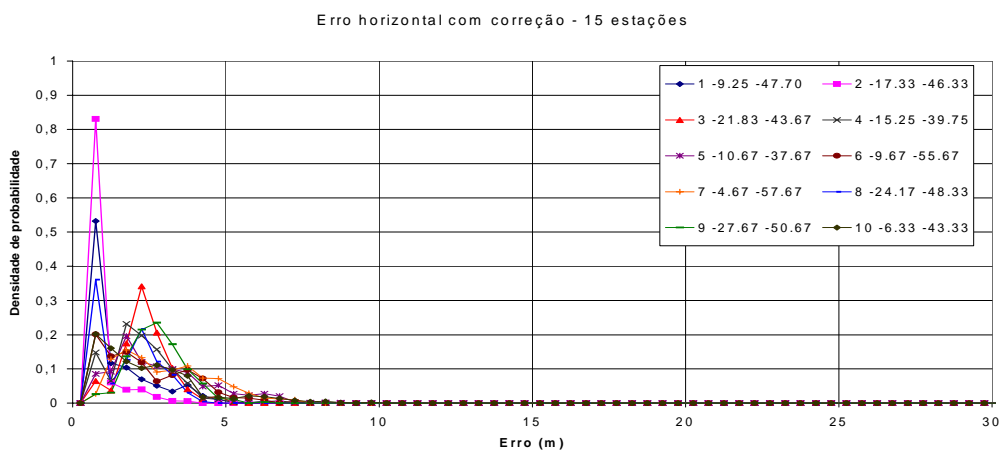
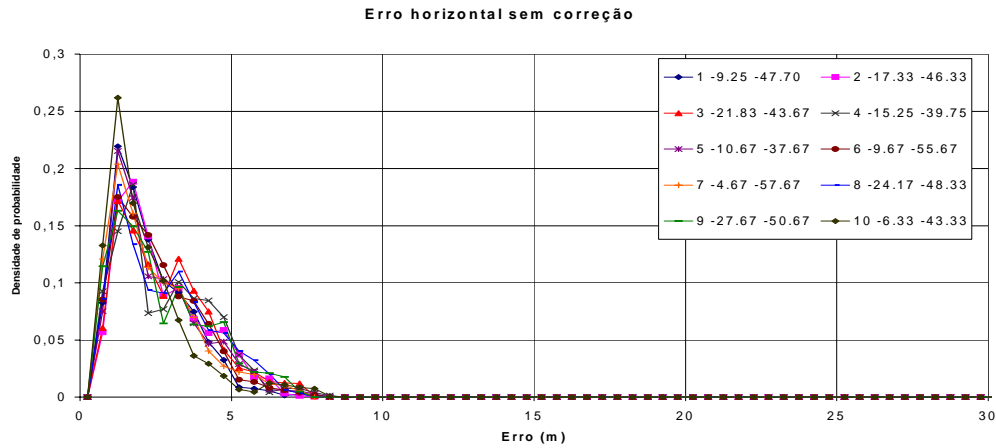


Figura 5.16 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

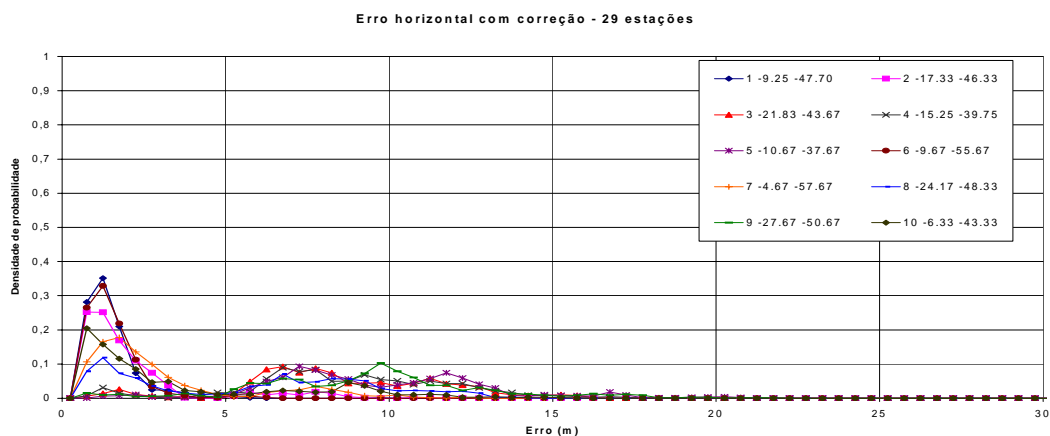
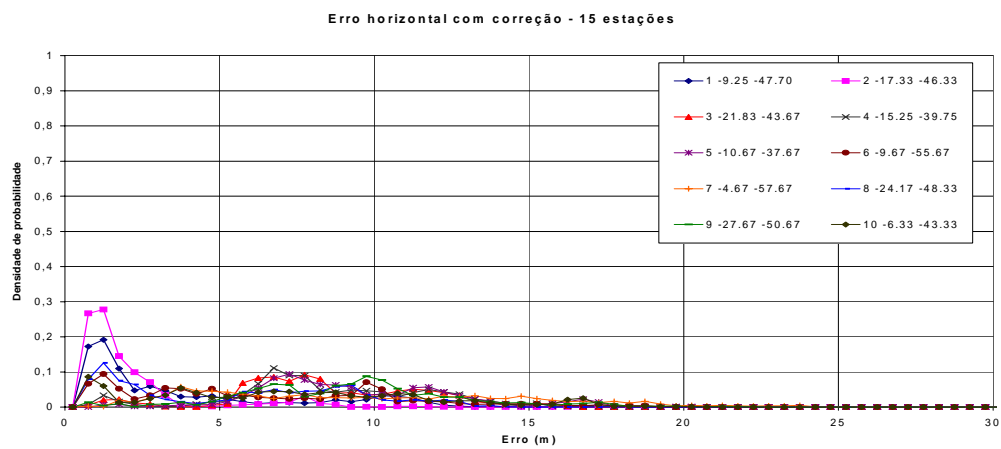
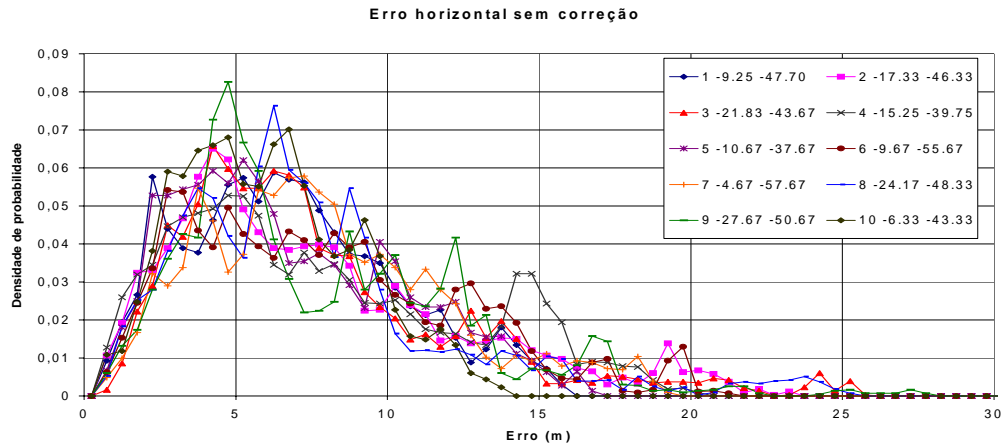


Figura 5.17 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

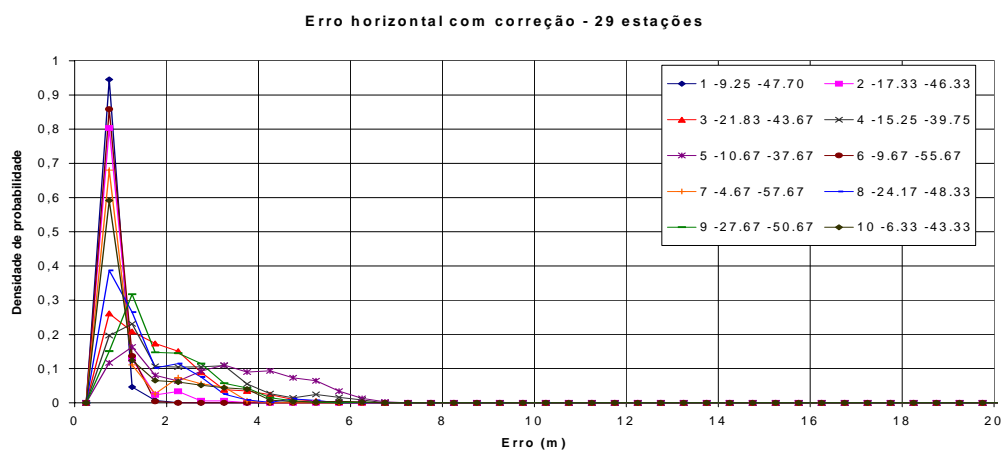
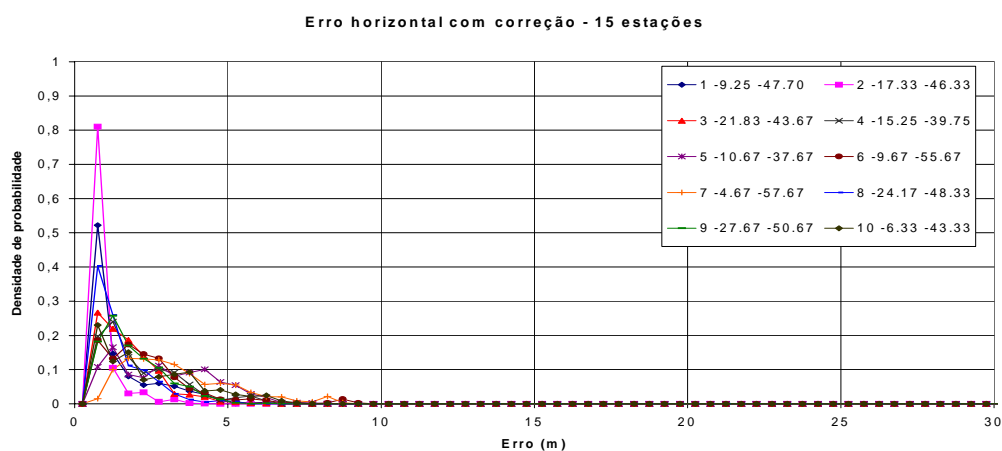
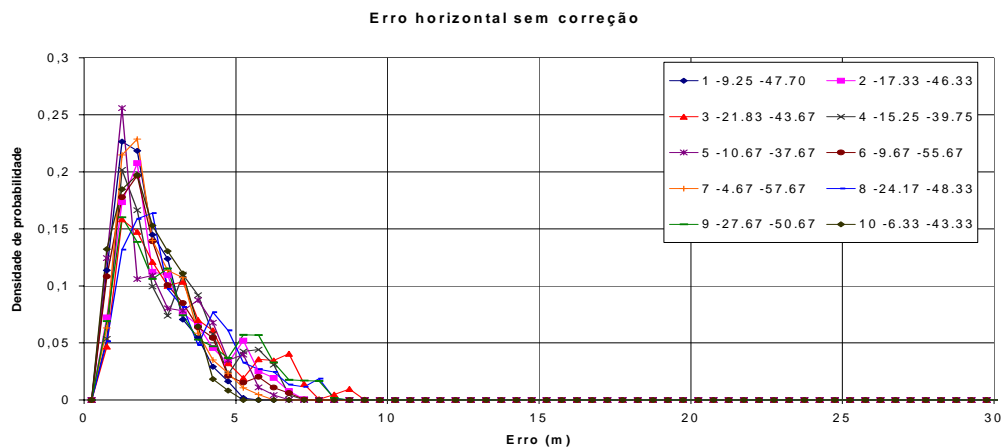


Figura 5.18 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

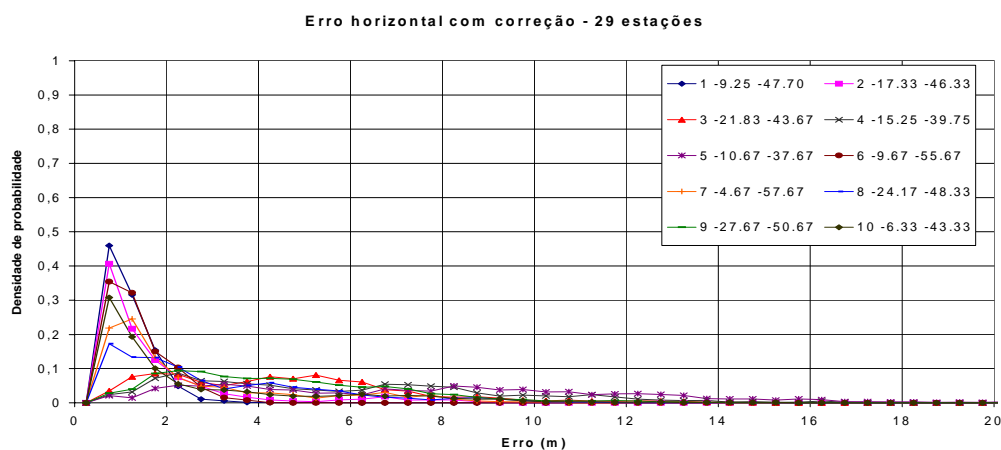
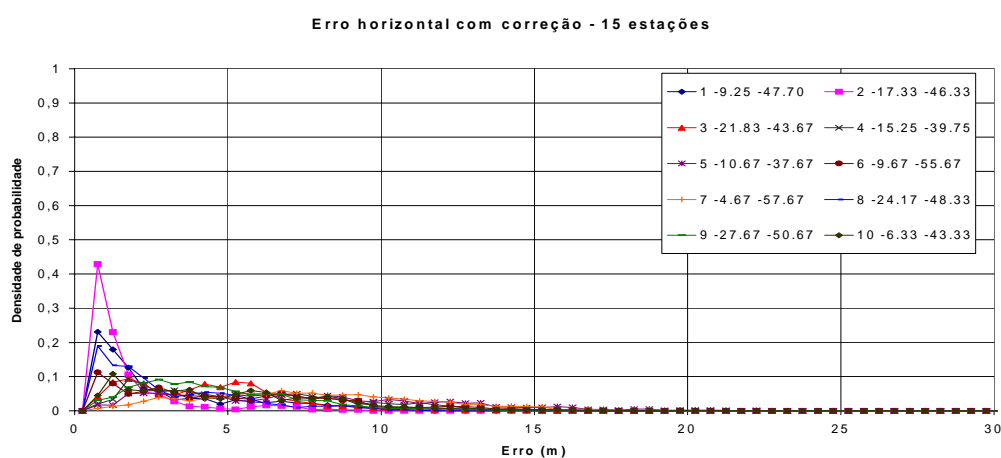
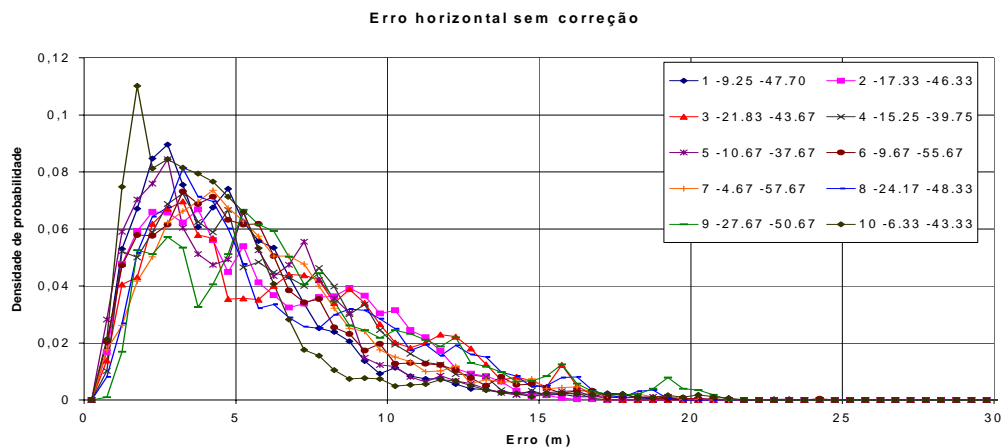


Figura 5.19 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

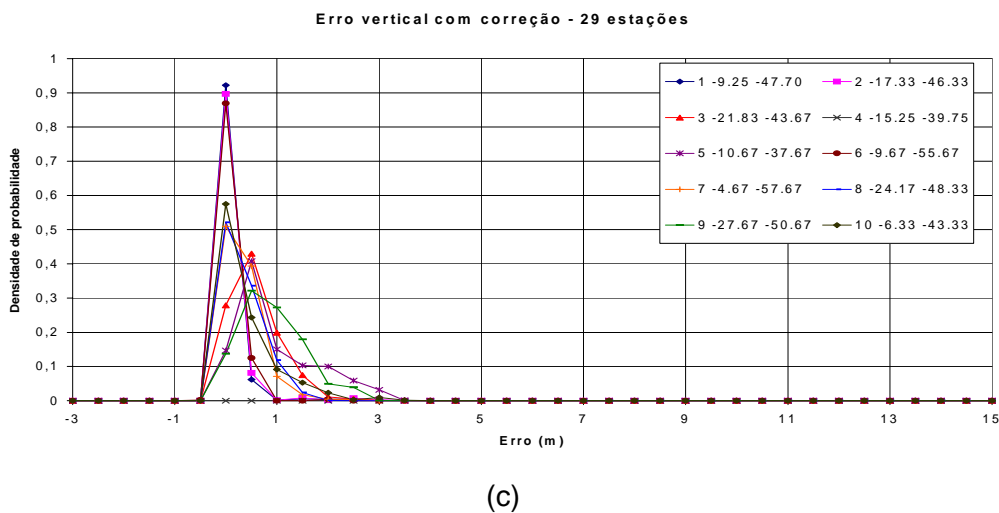
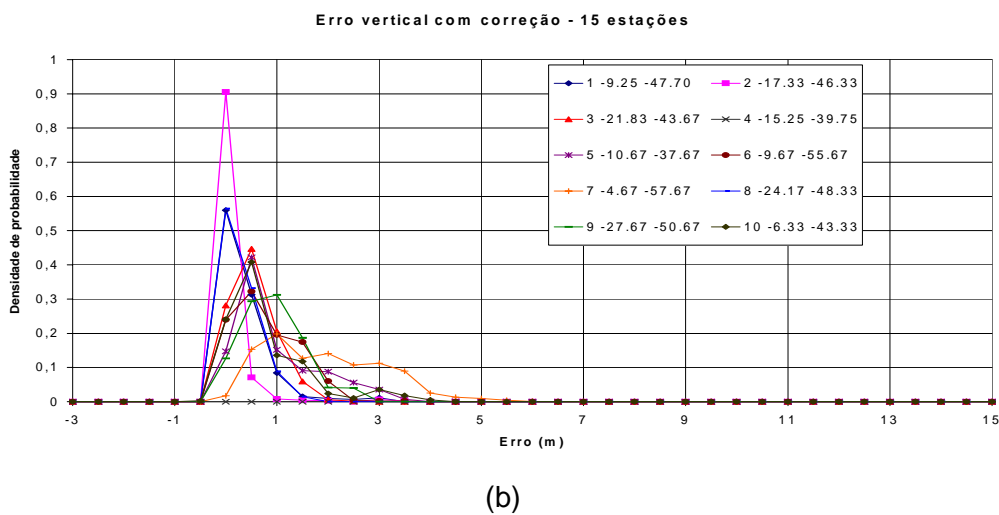
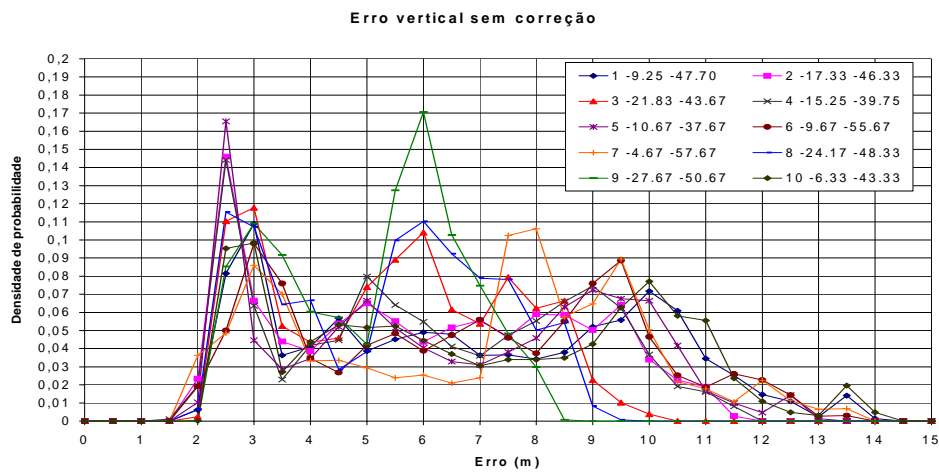


Figura 5.20 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

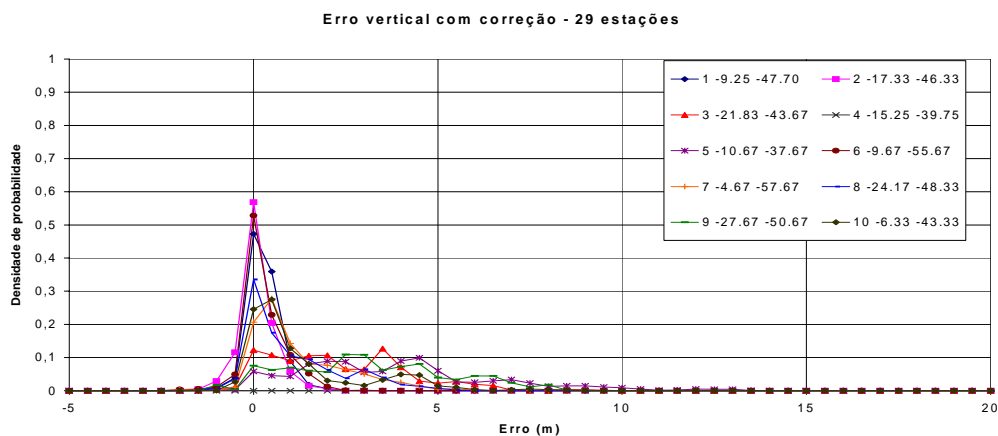
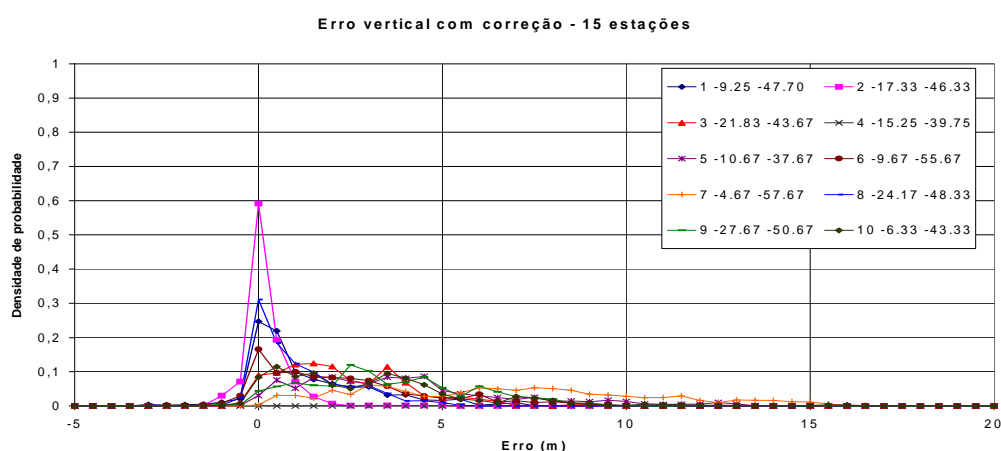
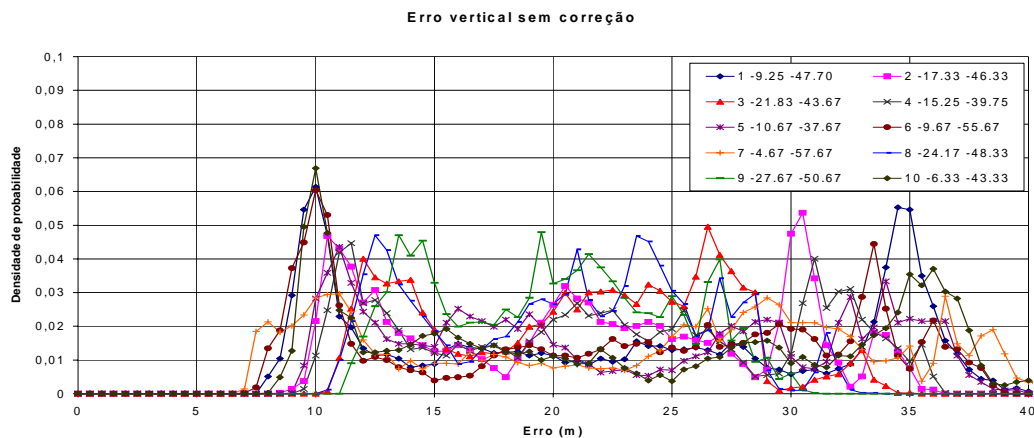


Figura 5.21 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

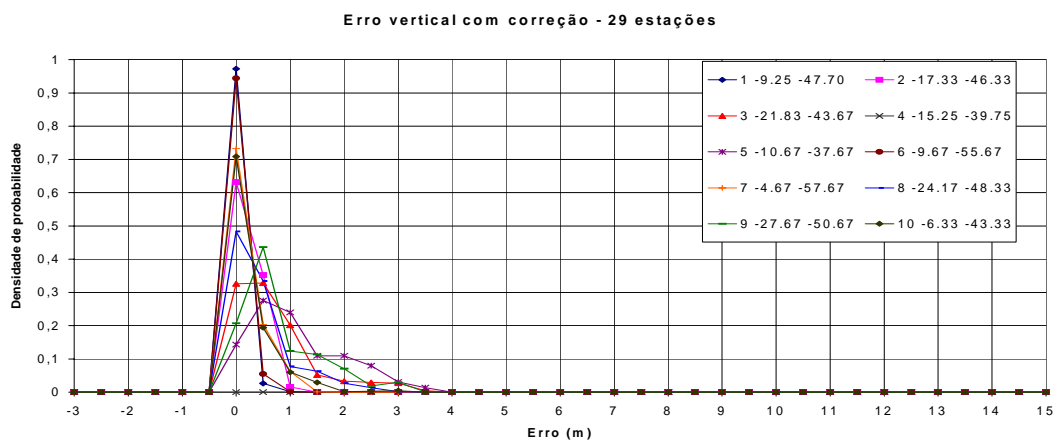
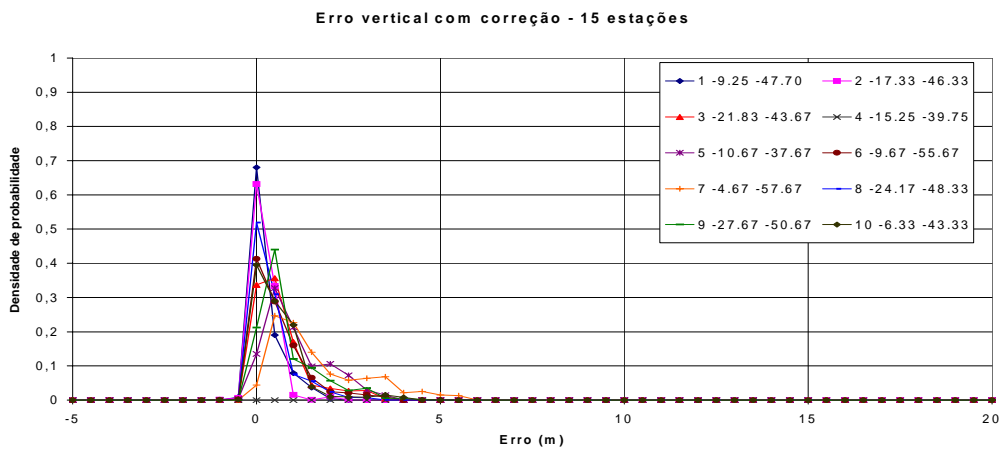
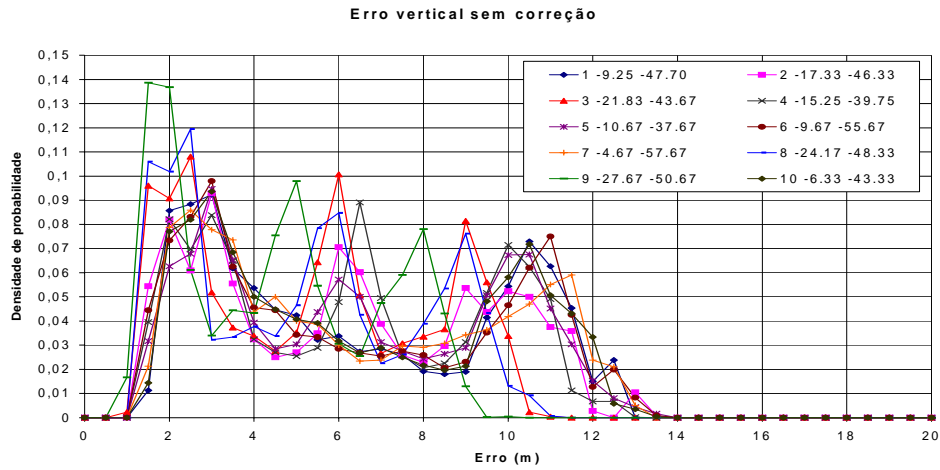


Figura 5.22 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

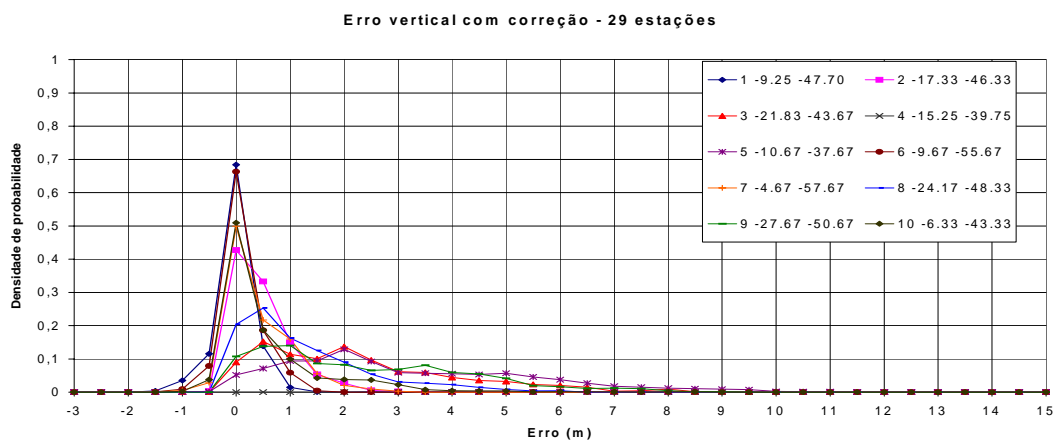
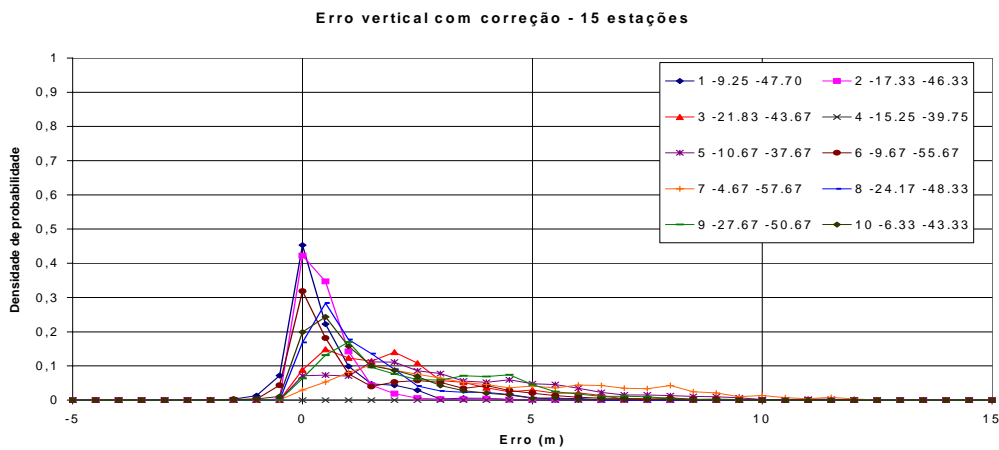
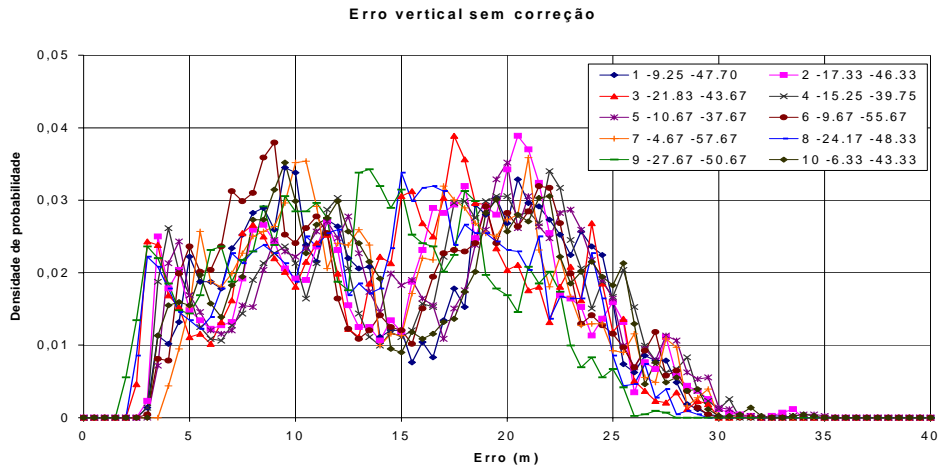


Figura 5.23 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência.

AV	JANEIRO DE 1996		JANEIRO DE 2002		JULHO DE 1996		JULHO DE 2002	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
1	2.35±1.24	6.83±3.09	6.79±1.24	22.67±10.06	2.06±0.98	6.35±3.45	4.94±3.09	15.19±6.71
2	2.66±1.40	5.97±2.63	7.66±1.39	21.40±7.62	2.62±1.46	3.10±3.23	5.77±3.36	15.56±6.69
3	2.80±1.49	5.45±2.04	7.67±1.50	21.11±5.93	3.07±1.81	5.23±2.76	6.34±3.77	14.75±6.48
4	2.79±1.54	6.10±2.64	7.81±1.54	22.29±7.83	2.76±1.52	6.15±3.17	5.63±3.20	16.07±6.89
5	2.55±1.44	6.46±2.92	6.79±1.43	22.81±9.03	2.40±1.37	6.37±3.28	5.17±3.25	16.05±6.83
6	2.55±1.35	6.79±2.92	7.85±1.35	22.21±9.64	2.39±1.32	6.27±3.53	5.54±3.46	14.83±6.71
7	2.43±1.43	6.89±2.92	7.84±1.43	23.56±9.99	2.25±1.06	6.38±3.46	5.89±3.46	15.22±6.28
8	2.76±1.53	5.32±1.93	7.51±1.53	20.56±5.60	2.98±1.68	5.07±2.71	6.25±3.92	14.34±6.33
9	2.70±1.41	5.09±1.59	7.77±1.58	19.97±4.89	3.08±1.83	4.44±2.38	6.96±4.13	13.03±5.90
10	2.20±1.58	6.94±3.16	6.09±1.41	23.04±10.33	2.09±0.96	6.37±3.41	4.48±3.23	15.36±6.80

Tabela 5.5 – Média e desvio padrão dos erros horizontal e vertical sem correção

AV	JAN96-15	JAN96-29	JAN02-15	JAN02-29	JUL96-15	JUL96-29	JUL02-15	JUL02-29
1	1.52±1.11	0.80±0.21	4.02±3.79	1.48±0.85	1.53±1.12	0.78±0.14	2.97±2.54	1.19±0.56
2	0.94±0.51	0.95±0.50	2.11±2.00	2.13±1.94	0.93±0.47	0.91±0.40	1.76±1.64	1.80±1.66
3	2.37±0.80	2.35±0.80	8.49±3.10	8.53±3.04	1.74±0.97	1.79±1.01	4.46±2.66	4.53±2.67
4	2.24±1.08	2.27±1.11	8.48±3.15	8.72±3.18	2.12±1.30	2.17±1.30	5.66±3.38	5.72±3.45
5	2.86±1.57	2.82±1.52	9.46±3.27	9.64±3.34	2.91±1.59	2.91±1.56	7.43±4.42	7.45±4.29
6	2.38±1.42	0.84±0.24	6.39±4.38	1.51±0.81	2.34±1.55	0.82±0.18	5.16±3.67	1.37±0.65
7	3.05±1.49	1.16±0.67	9.69±5.23	3.11±2.51	3.32±1.71	1.18±0.77	7.75±3.68	2.56±2.17
8	1.78±0.94	1.79±0.93	5.60±3.71	5.69±3.67	1.46±0.89	1.48±0.88	3.08±2.36	3.09±2.34
9	2.74±0.89	2.75±0.81	9.30±3.58	9.35±3.59	1.92±1.02	1.86±0.92	4.68±2.65	4.53±2.56
10	2.45±1.66	1.55±1.23	7.34±4.62	3.78±3.49	2.46±1.60	1.39±1.03	5.20±3.55	2.77±2.72

Tabela 5.6 – Média e desvio padrão do erro horizontal com correção

AV	JAN96-15	JAN96-29	JAN02-15	JAN02-29	JUL96-15	JUL96-29	JUL02-15	JUL02-29
1	0.33±0.51	0.06±0.27	1.33±1.68	0.27±0.46	0.23±0.42	0.01±0.08	0.45±0.85	0.01±0.48
2	0.08±0.34	0.08±0.34	0.18±0.59	0.10±0.47	0.20±0.33	0.19±0.25	0.49±0.69	0.47±0.57
3	0.53±0.44	0.56±0.49	2.32±1.74	2.30±1.83	0.64±0.73	0.67±0.74	2.16±1.77	2.24±1.80
4	0.55±0.62	0.61±0.68	2.56±2.22	2.58±2.29	0.72±0.67	0.77±0.63	2.50±2.34	2.53±2.26
5	0.95±0.83	0.95±0.80	3.92±2.86	3.81±2.69	1.05±0.85	1.09±0.85	3.13±2.32	3.15±2.27
6	0.76±0.62	0.07±0.20	2.28±2.27	0.27±0.56	0.58±0.72	0.03±0.12	1.43±1.88	0.10±0.36
7	1.90±1.14	0.31±0.39	6.64±3.79	1.19±1.26	1.63±1.28	0.16±1.29	4.03±2.86	0.40±0.60
8	0.27±0.35	0.32±0.39	1.10±1.26	1.04±1.29	0.40±0.58	0.43±0.56	1.21±1.17	1.22±1.20
9	0.92±0.60	0.90±0.62	3.48±2.19	3.13±2.17	0.82±0.82	0.79±0.73	2.49±1.90	2.34±1.90
10	0.78±0.82	0.37±0.58	3.11±2.78	1.33±1.70	0.58±0.74	0.22±0.43	1.26±1.32	0.58±1.04

Tabela 5.7 – Média e desvio padrão do erro vertical com correção

Como era de se esperar, os maiores erros verticais e horizontais ocorreram durante os períodos de máxima atividade solar (ano de 2002). Para para o solstício de verão (janeiro) de 2002, o maior erro vertical médio foi de

23.56 m (aeronave 7, Brasília – Manaus²) e o erro vertical superou 40 m, na ausência de correção pelo SBAS. O maior erro horizontal médio foi de 7.85 m (aeronave 6, Brasília – Manaus¹) e o maior erro horizontal obtido foi de aproximadamente 27 m, na ausência de correção pelo SBAS. Para o solstício de inverno (julho) de 2002 o maior erro vertical médio foi de 16.07 m (aeronave 4, Rio de Janeiro – Salvador) e o maior erro vertical obtido foi de aproximadamente 34 m, na ausência de correção pelo SBAS. O maior erro horizontal médio foi de 6.96 m (aeronave 9, Curitiba – Porto Alegre) e o maior erro horizontal obtido foi de aproximadamente 22 m, na ausência de correção pelo SBAS. Os maiores valores para os erros horizontal e vertical médios nos períodos de mínima atividade solar foram aproximadamente iguais a 3.08 m (aeronave 9, Curitiba – Porto Alegre) e 6.94 m (aeronave 10, Fortaleza – Brasília), respectivamente, na ausência de correção pelo SBAS.

Os resultados apresentados na tabela 5.5 indicam que, na ausência de correção pelo SBAS, os valores médios e os valores do desvio padrão dos erros verticais são, tipicamente, duas a três vezes maiores que os valores correspondentes dos erros horizontais. Entre as exceções a esta regra geral, destacam-se as razões entre os valores do desvio padrão dos erros verticais e horizontais apresentados nas colunas da tabela 5.5 relativas ao solstício de verão (janeiro) de 2002.

Observa-se que os resultados relativos às aeronaves 2 (Brasília – Belo Horizonte), 3 (Belo Horizonte – Rio de Janeiro), 4 (Rio de Janeiro – Salvador), 5 (Salvador – Recife), 8 (São Paulo – Curitiba) e 9 (Curitiba – Porto Alegre) apresentados nas tabelas 5.6 e 5.7 sofreram poucas alterações como resultado da expansão do sistema de 15 para 29 estações de referência. Os motivos podem ser que as novas estações não se encontravam nas áreas próximas às aeronaves para prover uma melhor cobertura ou que a adição da estação não trouxe uma melhoria significativa para estas mesmas áreas. Por outro lado, as aeronaves 1 (Belém – Brasília), 6 (Brasília – Manaus 1), 7 (Brasília – Manaus 2) e 10 (Fortaleza – Brasília) sofreram significativa correção dos erros como resultado da expansão do sistema de 15 para 29 estações de referência. De fato, as regiões próximas às aeronaves 1, 6, 7 e 10 tinham cobertura deficiente, conforme indicado na figura 5.1, e se beneficiaram pela adição de estações de referência em Porto Nacional\TO, Cachimbo\PA, Porto Velho\RO, entre outras.

Em geral, as tabelas 5.5 e 5.6 não mostram diminuições apreciáveis nos valores médios dos erros horizontais resultantes das correções impostas pelo SBAS. Mesmo assim, pode-se observar nas figuras 5.16 a 5.19 que, em geral,

os valores dos erros horizontais excedidos durante percentagens do tempo elevadas sofreram diminuições resultantes das correções impostas pelo SBAS. Isto é, os histogramas correspondentes aos erros corrigidos se concentraram nas proximidades da origem do eixo horizontal. Por outro lado, uma comparação entre os valores correspondentes das tabelas 5.5 e 5.7 mostram que as correções impostas pelo SBAS impuseram grandes diminuições nos valores da média e do desvio padrão dos erros verticais. As figuras 5.20 a 5.23 mostram que, em geral, os valores dos erros verticais excedidos durante percentagens do tempo elevadas também sofreram diminuições resultantes das correções impostas pelo SBAS.