

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**ADELITON DA FONSECA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES MODELOS TROPOSFÉRICOS PARA  
RTK EM REDE USANDO O CONCEITO DE ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA  
VIRTUAL**

**CURITIBA  
2013**

**ADELITON DA FONSECA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES MODELOS TROPOSFÉRICOS PARA  
RTK EM REDE USANDO O CONCEITO DE ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA  
VIRTUAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná.

**Orientador: Prof.º Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira**

**Co-orientadora: Prof.º Dr.(a) Daniele Barroca Marra Alves**

**CURITIBA  
2013**

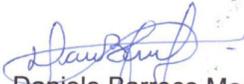
## TERMO DE APROVAÇÃO

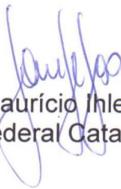
ADELITON DA FONSECA DE OLIVEIRA

*"ANÁLISE COMPARATIVA DE DIFERENTES MODELOS TROPOSFÉRICOS PARA  
RTK EM REDE USANDO O CONCEITO DE ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA  
VIRTUAL"*

Dissertação nº 262 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Co-Orientadora:

  
Profª. Drª. Daniele Barroca Marra Alves  
Universidade Estadual Paulista, UNESP

  
Prof. Dr. Maurício Ihlenfeldt Sejas  
Instituto Federal Catarinense, IFC

  
Profª. Drª. Claudia Pereira Krueger  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 26 de abril de 2013.

*Dedico este trabalho:  
Aos meus Pais, Marçal dos Anjos Neto e Maria Aparecida  
Fonseca, pessoas especiais em minha vida, pelo apoio e  
dedicação nas horas de dificuldades.  
Aos meus irmãos, Weliton, Donizete e Rogério pelo apoio,  
incentivo, ajuda e amizade.  
A todos que colaboraram, de forma direta e  
indireta, para que fosse possível a realização  
deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre presente ao longo da minha trajetória, sem Ele a vida não teria sentido.

Agradeço especialmente a meus pais, as pessoas que mais respeito e admiro, pois sempre esforçaram o máximo que podiam para proporcionar o melhor para mim e aos meus irmãos.

Aos meus irmãos, Weliton, Donizete e Rogério, por sempre me apoiarem. Aos meus avós Ismael, Franklin, Diva e Nair, os maiores exemplos que tenho de luta e superação.

A todos meus familiares, especialmente minha madrinha Graciana e o meu padrinho Simão, aos meus tios José Maria, Geraldo, Jair e Flor de Maio, que sempre me apoiaram.

Agradeço a amizade e confiança da professora Daniele e do professor Luiz Danilo, não só pela orientação, mas também por inúmeros e valiosos ensinamentos.

Agradecimento especial à professora Daniele por tornar possível a realização deste trabalho, não só pelo apoio nas correções, mas também pelas cobranças.

Aos amigos e professores, Igor Ribeiro Lenartovicz, Marly Teresinha, Henry Montecino, Lineardo, Monica Kleuser, Cláudia Krueger, Anderson Viski, Maurício Sejas, Tiago Lima e Luiz Fernando pela amizade e bons momentos durante a fase de mestrado.

Aos amigos da moradia na república “os caras” George Deroco, Ricão, Vinícius Rofatto e Ricardo Javier pela amizade e acolhimento na FCT/UNESP.

Ao pessoal do LGE da FCT/UNESP Bruno, Rogério, Chaenne Milene, Heloísa, Hérica e Fabrício Prol pela amizade, auxílio e companheirismo em Presidente Prudente.

Aos amigos da UFRRJ Rafael Fernandes, Norton, Alessandro, Sebastião, Jovelino e Dalvaneide e a todos da turma de Engenharia de Agrimensura de 2006–I.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR) e à Universidade Estadual Paulista (UNESP), pela oportunidade e disponibilidade das instalações para realização deste trabalho de mestrado nos laboratórios LAGEH (UFPR) e LGE (FCT/UNESP).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao desenvolvimento dessa pesquisa.

*“Posso não ter um centavo no bolso, mas tenho um sorriso  
no rosto e isso vale mais que todo dinheiro do mundo.”*

*Don Ramón (“Seu Madruga”)*

## RESUMO

Dentre os principais erros dependentes da distância, depois da ionosfera, a troposfera é a maior fonte de erros nas observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). O sinal emitido pela antena do satélite ao passar por essa camada sofre refração, o que acarreta mais tempo para o mesmo chegar até a antena do receptor GPS. O Atraso Zenital Total (ZTD), subdividido nas componentes úmida (ZWD) e hidrostática (ZHD), pode atingir magnitude de até 0,35 m e 2,3 m respectivamente, podendo aumentar dez vezes próximo ao horizonte. Utilizando dados de múltiplas estações de referência é possível obter acuracidade a nível centimétrico. Além disso, esses dados possibilitam a modelagem dos erros espacialmente correlacionados (ionosfera, troposfera e erro de órbita). Dentre os diversos métodos atualmente desenvolvidos para formular correções a partir de dados de estações de referência, merece destaque a VRS (*Virtual Reference Station*). No conceito de VRS, os dados de uma estação base que não existe fisicamente são gerados nas proximidades do usuário. Nessa pesquisa o objetivo era atuar na modelagem da troposfera. Assim, para atenuar tal efeito empregou-se o modelo empírico de Hopfield e os modelos dinâmicos de PNT (Previsão Numérica de Tempo) desenvolvidos em centros de pesquisa como o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Com base nos modelos troposféricos existentes, buscou-se avaliar o comportamento do EMQ (Erro Médio Quadrático) nas coordenadas finais das VRSs geradas. Nos modelos foram utilizadas as funções de mapeamento de Niell e VMF1 (*Vienna Mapping Function 1*). Assim, no primeiro experimento foram realizados testes comparativos nas quatro estações do ano com os modelos dinâmicos PNT/ECMWF e PNT/INPE, além do modelo teórico de Hopfield. É importante destacar que a função de mapeamento VMF1 foi implementada e testada para os diferentes modelos citados. Na análise de qualidade dos dados da VRS foi utilizado o método de PP (Posicionamento por Ponto) e PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), com o quais foi possível analisar a qualidade dos dados da VRS. No método de PP verificou-se que a diferença entre os modelos de Hopfield e PNT/ECMWF atingiu magnitude de 6,8% com dados de 24 horas. Já no PPP, foram obtidas diferenças médias entre os modelos de Hopfield e PNT/INPE, de 15,47% utilizando 24 horas de dados. Em um segundo experimento avaliou-se a qualidade dos dados das VRS, a partir da variação do comprimento da linha de base entre a estação base da rede e a posição da VRS. Constatou-se que para menores distâncias entre a estação base e a posição da VRS melhores valores de EMQ são obtidos.

**Palavras chave:** RTK em Rede; VRS; Modelos Troposféricos; VMF1.

## ABSTRACT

Among the distance dependent errors, after the ionosphere, the troposphere is the largest error source in GNSS (Global Navigation Satellite Systems) observables. When the signal emitted by antenna satellite cross this layer is subjected to refraction, which causes a delay. The Zenith Total Delay (ZTD) is subdivided into wet (ZWD) and hydrostatic (ZHD) components, they can get a magnitude of 0.35 m and 2.3 m respectively, which can increase ten times close to horizon. Using data from multiple reference stations is possible to obtain centimeter-level accuracy. The advantage of this methodology is the possibility of modeling the spatially correlated errors (ionosphere, troposphere and orbit error). Among the various methods currently developed to make corrections from the reference station data, the VRS (Virtual Reference Station) has been very used. Using the VRS concept data from a base station that does not physically exist are generated near to the user. In this research, the goal is the troposphere modeling. In this sense, we used the Hopfield empirical model and dynamic models of PNT (Numerical Weather Prediction) developed at research centers like INPE (National Institute for Space Research) and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Based on existing tropospheric models, we try to evaluate the RMS (Root Mean Square) behavior in the final VRSs coordinates. We used Niell and VMF1 (Vienna Mapping Function 1) mapping functions. In the first experiment were conducted comparative tests in four seasons with PNT/ECMWF and PNT/INPE dynamic models and Hopfield theoretical model. VMF1 mapping function was implemented and tested for the different mentioned models. In order to analyze the VRS data quality it was used the PP (Point Positioning) and PPP (Precise Point Positioning) methods. In PP was found a difference between Hopfield and PNT/ECMWF models of 6.8% considering 24h of data. Concerning PPP it was obtained mean differences between PNT/INPE and Hopfield models of 15.47% using 24 hours of data. In a second experiment, it was evaluated the VRS data quality under baseline variation (modification of baseline length between the network base station and the VRS position). It was found that for smaller distances between the base station and VRS position better RMS values are obtained.

**Palavras chave:** Network RTK; VRS; Tropospheric Models; VMF1.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONTAGEM DE CICLOS INTEIROS PELAS ONDAS PORTADORAS ENTRE SATÉLITE-RECEPTOR.....	28
FIGURA 2 – ESTAÇÕES DA REDE IGS DISTRIBUÍDAS A NÍVEL GLOBAL.....	30
FIGURA 3 – ESTAÇÕES GNSS DA RBMC/RIBAC.....	31
FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES QUE COMPÕE A REDE GNSS/SP.....	32
FIGURA 5 – COMPONENTES DA ARQUITETURA DO RTK EM REDE E FLUXO DOS DADOS.....	37
FIGURA 6 – MODELO DE PLANO INCLINADO (3 PARÂMETROS) PARA CORRELAÇÃO DOS ERROS ESPACIAIS.....	39
FIGURA 7 – GERAÇÃO DE CORREÇÕES DO MAC.....	41
FIGURA 8 – GERAÇÃO DE CORREÇÕES FKP/ACP.....	42
FIGURA 9 – CONCEITO DE VRS PARA POSICIONAMENTO RTK.....	44
FIGURA 10 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO ENTRE A ESTAÇÃO BASE E A VRS.....	48
FIGURA 11 – SUBDIVISÃO DA IONOSFERA.....	50
FIGURA 12 – MAPA GLOBAL DA IONOSFERA (GIM).....	52
FIGURA 13 – MODELAGEM DA IONOSFERA EM UMA CAMADA INFINITESIMAL.....	54
FIGURA 14 – PERFIL VERTICAL DA ATMOSFERA.....	55
FIGURA 15 – ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO NO SINAL GPS NA ATMOSFERA, NA DIREÇÃO SATÉLITE – RECEPTOR.....	56
FIGURA 16 – MAPA DO ATRASO DA TROPOSFERA GERADO POR MODELO DE PNT.....	61
FIGURA 17 – PÁGINA VIRTUAL DO CENTRO EUROPEU DE PREVISÃO DO TEMPO A MÉDIO PRAZO.....	63
FIGURA 18 – VARIAÇÃO DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE.....	65
FIGURA 19 – VARIAÇÃO DIÁRIA DA COMPONENTE ZWD NOS MODELOS.....	65
FIGURA 20 – VARIAÇÃO DIÁRIA DA COMPONENTE ZHD NOS MODELOS.....	66
FIGURA 21 – ESQUEMA DAS FUNÇÕES DE MAPEAMENTO.....	68
FIGURA 22 – TÉCNICA RAY-TRACING EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE.....	72
FIGURA 23 – COMPORTAMENTO DO ATRASO TROPOSFÉRICO INCLINADO UTILIZANDO A FUNÇÃO COSSECANTE DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE ( $\text{sen}^{-1}$ ).....	74
FIGURA 24 – COMPORTAMENTO DO ATRASO TROPOSFÉRICO INCLINADO UTILIZANDO A FUNÇÃO DE NIELL.....	74
FIGURA 25 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ESTAÇÕES DA REDE GNSS/SP.....	77

FIGURA 26 – ESTAÇÃO PPTTE PRÓXIMO AO CENTRO DE CONTROLE DA REDE GNSS/SP .....	78
FIGURA 27 – ANTENA TRIMBLE GNSS CHOKE RING .....	79
FIGURA 28 – ETAPAS PARA GERAÇÃO DA VRS SEM SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES NO RTK EM REDE.....	80
FIGURA 29 – SÉRIE TEMPORAL DAS ESTAÇÕES PPTTE E SPAR .....	83
FIGURA 30 – FORMATO DO ARQUIVO OS COEFICIENTES CONTENDO OS COEFICIENTES E O ATRASO TROPOSFÉRICO.....	86
FIGURA 31 – ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA VMF1 E PNT/ECMWF EM AMBIENTE C++ .....	87
FIGURA 32 – VRS GERADA A PARTIR DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DA REDE GNSS/SP .....	89
FIGURA 33 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO.....	91
FIGURA 34 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO.....	92
FIGURA 35 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO.....	94
FIGURA 36 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO.....	94
FIGURA 37 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO.....	97
FIGURA 38 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO.....	97
FIGURA 39 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO.....	99
FIGURA 40 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO.....	99
FIGURA 41 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO .....	101
FIGURA 42 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO .....	102
FIGURA 43 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO .....	104
FIGURA 44 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO .....	104
FIGURA 45 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA.....	106
FIGURA 46 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA.....	107

FIGURA 47 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA.....	109
FIGURA 48 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA.....	109
FIGURA 49 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO .....	111
FIGURA 50 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO .....	112
FIGURA 51 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO.....	114
FIGURA 52 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO.....	114
FIGURA 53 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO .....	116
FIGURA 54 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO .....	117
FIGURA 55 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO .....	119
FIGURA 56 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO.....	120
FIGURA 57 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO .....	122
FIGURA 58 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO .....	122
FIGURA 59 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO.....	124
FIGURA 60 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO.....	125
FIGURA 61 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO PRIMAVERA.....	127
FIGURA 62 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO PRIMAVERA.....	127
FIGURA 63 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO.....	129
FIGURA 64 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO.....	129
FIGURA 65 – DIFERENÇAS ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF EM DIAS ÚMIDOS .....	133
FIGURA 66 – DIFERENÇAS ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF EM DIAS SECOS.....	135

FIGURA 67 – VARIAÇÕES ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF PARA DIAS ÚMIDOS.....	137
FIGURA 68 – VARIAÇÕES ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF PARA DIAS SECOS.....	138
FIGURA 69 – CÁLCULO DO EMQ PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP MODO ESTÁTICO .....	140
FIGURA 70 – CÁLCULO DO EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP MODO ESTÁTICO .....	141
FIGURA 71 – CÁLCULO DO EMQ PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO.....	143
FIGURA 72 – CÁLCULO DO EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP MODO CINEMÁTICO.....	143
FIGURA 73 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO .....	145
FIGURA 74 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO .....	146
FIGURA 75 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO.....	148
FIGURA 76 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO.....	148
FIGURA 77 – DIFERENÇAS DE EMQ COM VARIAÇÃO DA LINHA BASE .....	151

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – FONTES ERROS OU EFEITOS QUE ATUAM SOBRE AS OBERVÁVEIS GNSS .....	33
QUADRO 2 – MAGNITUDE DOS PRINCIPAIS ERROS DEPENDENTES DA ESTAÇÃO E DA DISTÂNCIA NO POSICIONAMENTO EM REDE .....	34
QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CORREÇÃO NO RTK EM REDE .....	45
QUADRO 4 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO IONOSFÉRICA.....	49
QUADRO 5 – COEFICIENTES DAS COMPONENTES HIDROSTÁTICA E ÚMIDA DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DE NIELL .....	71
QUADRO 6 – TIPOS DE ANTENAS E RECEPTORES DA REDE GNSS/SP.....	78
QUADRO 7 – QUADRO CONTENDO OS DIAS AMOSTRAIS SECOS (S) E ÚMIDOS (U).....	84
QUADRO 8 – COORDENADAS APROXIMADAS DA POSIÇÃO DA VRS (PPTE).....	85
QUADRO 9 – SIGNIFICADO DAS SIGLAS UTILIZADAS EM DIFERENTES MODOS DA VRS.....	90

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm) .....	93
TABELA 2 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm).....	93
TABELA 3 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm) .....	95
TABELA 4 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm).....	96
TABELA 5 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm) .....	98
TABELA 6 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO MÉTODO PP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm) .....	98
TABELA 7 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO MÉTODO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm).....	100
TABELA 8 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm).....	101
TABELA 9 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm).....	103
TABELA 10 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm) .....	103
TABELA 11 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm) .....	105
TABELA 12 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm) .....	106
TABELA 13 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm) .....	108
TABELA 14 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm).....	108
TABELA 15 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm).....	110
TABELA 16 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm).....	110
TABELA 17 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm) .....	113
TABELA 18 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm).....	113
TABELA 19 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm) .....	115

TABELA 20 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm).....	116
TABELA 21 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm).....	118
TABELA 22 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm).....	118
TABELA 23 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm).....	120
TABELA 24 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (CM).....	121
TABELA 25 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm).....	123
TABELA 26 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm).....	124
TABELA 27 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm).....	125
TABELA 28 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm).....	126
TABELA 29 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm).....	128
TABELA 30 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm).....	128
TABELA 31 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP CINEMÁTICO (cm).....	130
TABELA 32 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm).....	131
TABELA 33 – SUMÁRIO DO DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF EM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD PARA DIAS ÚMIDOS (NIELL).....	132
TABELA 34 – DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF COM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD EM DIAS SECOS (NIELL).....	134
TABELA 35 – DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF COM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD EM DIAS ÚMIDOS (VMF1).....	136
TABELA 36 – DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF COM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD EM DIAS SECOS (VMF1).....	138
TABELA 37 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PPP MODO ESTÁTICO (cm).....	142
TABELA 38 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PPP MODO CINEMÁTICO (cm).....	144
TABELA 39 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PP MODO ESTÁTICO (cm).....	147
TABELA 40 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PP MODO CINEMÁTICO (cm).....	149
TABELA 41 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES LINHAS DE BASE (cm).....	150

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CPTEC	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DDF	–	Dupla Diferença de Fase
DG	–	Deslocamento Geométrico
ECMWF	–	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EMQ	–	Erro Médio Quadrático
FCT	–	Faculdade de Ciência e Tecnologia
FG	–	<i>First Guess</i>
FKP/ACP	–	<i>Flächenkorrekturparameter – Area Correction Parameters</i>
GNSS	–	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GMF	–	<i>Global Mapping Function</i>
GPS	–	<i>Global Position System</i>
GSM	–	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	–	<i>International GNSS Service</i>
INMET	–	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	–	<i>Ionosphere Map Exchange Format</i>
JPL	–	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
MAC	–	<i>Master-Auxiliary Concept</i>
MGI	–	Modelo Global da Ionosfera
NMEA	–	<i>National Marine Electronics Association</i>
NTRIP	–	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
NWM	–	<i>Numerical Weather Model</i>
OTF	–	<i>On The Fly</i>
PD	–	Pseudodistância
PNT	–	Previsão Numérica de Tempo
RBMC	–	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RIBaC	–	Rede Inbra de Bases Comunitárias do GNSS

RINEX	–	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RTCM	–	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	–	<i>Real Time Kinematic</i>
RTX	–	<i>Real Time Extended</i>
TEC	–	<i>Total Electron Content</i>
VLBI	–	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>
VMF	–	<i>Vienna Mapping Function</i>
VMF1	–	<i>Vienna Mapping Function 1</i>
VRS	–	<i>Virtual Reference Station</i>
VRC	–	<i>Virtual Reference Cell</i>
VTEC	–	<i>Vertical Total Electron Content</i>
UNESP	–	Universidade Estadual Paulista
ZHD	–	<i>Zenithal Hydrostatic Delay</i>
ZWD	–	<i>Zenithal Wet Delay</i>
ZTD	–	<i>Zenithal Tropospheric Delay</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS .....	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos .....	22
1.2	JUSTIFICATIVA .....	22
1.2.1	Estruturação do Trabalho .....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1	OBSERVÁVEIS GPS.....	25
2.1.1	Observável Pseudodistância ( $PD_r^s$ ) .....	26
2.1.2	Observável Fase da Onda Portadora ( $\phi_r^s$ ) .....	27
2.2	REDES DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA .....	28
2.2.1	Principais Fontes de Erros Envolvidas no Posicionamento GNSS.....	32
2.3	POSICIONAMENTO BASEADO EM REDES GNSS .....	34
2.3.1	Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK) .....	34
2.3.2	Posicionamento RTK em Rede.....	36
2.3.2.1	Algoritmo de Derivadas Parciais .....	38
2.3.2.2	Algoritmos de Interpolação .....	39
2.3.2.3	Algoritmos Envolvendo Ajustamento Condicional .....	39
2.3.2.4	MAC ( <i>Master-Auxiliary Concept</i> ).....	40
2.3.2.5	FKP/ACP.....	41
2.3.2.6	Trimble RTX ( <i>Real-Time Extended</i> ).....	42
2.3.3	Estação de Referência Virtual.....	43
2.3.3.1	Geração de Dados de Estação de Referência Virtual .....	46
2.4	PRINCIPAIS EFEITOS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO EM REDES ...	49
2.4.1	Efeito Ionosférico.....	49
2.4.1.1	Modelos para Ionosfera .....	51
2.4.2	Refração Troposférica .....	54
2.4.2.1	Modelos para Troposfera.....	57
2.4.2.1.1	Modelo de Hopfield.....	57
2.4.2.1.2	Modelo de Saastamoinen .....	58
2.4.2.1.3	Modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) – CPTEC/INPE.....	59
2.4.2.1.4	Modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) – ECMWF .....	62
2.4.2.1.5	Componentes de Atraso Troposférico.....	64
2.4.2.2	Funções de Mapeamento da Troposfera .....	67
2.4.2.2.1	Função de Mapeamento de Marini .....	68
2.4.2.2.2	Função de Mapeamento de Chao.....	69
2.4.2.2.3	Função de Mapeamento de Herring.....	69
2.4.2.2.4	Função de Mapeamento de Niell .....	70
2.4.2.2.5	Função de Mapeamento de Vienna .....	71
2.4.2.2.6	Função de Mapeamento GMF .....	73
2.4.2.2.7	Funções de Mapeamento no Atraso Troposférico.....	73
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>76</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	76
3.2	EQUIPAMENTOS E SOFTWARES DE MONITORAMENTO DA REDE .....	77
3.2.1	Antenas e Receptores .....	78
3.3	METODOLOGIA PARA GERAR OS DADOS DA VRS .....	79
3.4	GERAÇÃO DA VRS COM DIFERENTES MODELOS TROPOSFÉRICOS.....	81
3.4.1	Observações Meteorológicas Utilizando Séries Temporais .....	81
3.4.1.1	Determinação das Amostras.....	82
3.4.2	Implementação da Função de Mapeamento VMF1 e o Modelo PNT/ECMWF ...	85
3.4.3	Análise de Qualidade com Aplicação do EMQ.....	87

3.5	GERAÇÃO DA VRS COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DAS ESTAÇÕES.....	88
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
4.1	AVALIAÇÃO DOS MODELOS TROPOSFÉRICOS E FUNÇÕES DE MAPEAMENTO PARA DIAS ÚMIDOS E SECOS.....	90
4.1.1	Posicionamento por Ponto.....	91
4.1.1.1	Estação Verão.....	91
4.1.1.2	Estação Outono.....	96
4.1.1.3	Estação Inverno.....	101
4.1.1.4	Estação Primavera .....	106
4.1.2	Posicionamento por Ponto Preciso.....	111
4.1.2.1	Estação Verão.....	111
4.1.2.2	Estação Outono.....	116
4.1.2.3	Estação Inverno.....	121
4.1.2.4	Estação Primavera .....	126
4.1.2.5	Algumas conclusões.....	131
4.2	GERAÇÃO DA VRS COM VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE.....	139
4.2.1	Processamento da VRS no Método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).....	139
4.2.2	Processamento da VRS no Método de Posicionamento por Ponto (PP).....	145
4.2.3	Algumas conclusões.....	150
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>152</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	152
5.2	ALGUMAS RECOMENDAÇÕES.....	154
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>164</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existe um conjunto de sistemas de posicionamento global operando ou em fase de desenvolvimento, dentre os primeiros sistemas destacam-se o norte americano GPS (*Global Position System*), seguido do russo GLONASS (*GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema - Global Orbiting Navigation Satellite System*) (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008). Já os sistemas Compass (DRAGONINSPACE, 2013), e Galileo deverão estar com a constelação completa até 2020 (GALILEOIC, 2013).

A tecnologia GNSS trata-se de um termo genérico envolvendo diversos sistemas de posicionamento, além dos sistemas supracitados, englobam-se a este conceito os SBAS (*Satellite Base Argumentation System*) que são sistemas regionais compostos de satélites geostacionários, para cobrir a área operacional, e do segmento de controle, para dar suporte à navegação (MONICO, 2008).

Desta forma, tem-se buscado realizar posicionamento integrando os diversos sistemas de posicionamento global. O objetivo é explorar as melhorias e benefícios dos sistemas em conjunto. No caso do GPS e GLONASS essa ideia já é uma realidade disponibilizada nos receptores geodésicos.

Os receptores GNSS podem disponibilizar dados para a realização de posicionamento em tempo real com acuracidade a nível centimétrico (DAI *et al.*, 2003). Uma possibilidade é o uso do método denominado RTK (*Real Time Kinematic*), onde são empregados dois receptores. Um deles, denominado estação base, fica posicionado em um ponto de coordenadas conhecidas, enquanto outro receptor móvel (usuário), também denominado *rover* realiza o posicionamento dos pontos de interesse. Mas, o RTK é uma técnica limitada quando se aumenta o comprimento da linha de base entre a estação referência (base) e a móvel. Isso ocorre devido à influência dos efeitos atmosféricos, que são proporcionais ao comprimento da linha de base, degradando a posição do receptor móvel (KRUEGER, 1994; KRUEGER, 1996; PRADO e KRUEGER 2003; RAMOS, 2007; MONICO, 2008).

O uso de dados de redes GNSS permite a modelagem dos erros atmosféricos (ionosfera e troposfera) que atuam no posicionamento, melhorando a qualidade do posicionamento. No posicionamento baseado em redes, ao invés de enviar as

correções ao usuário (estação móvel), uma alternativa seria gerar um arquivo de dados GNSS nas proximidades do usuário, esse método é denominado VRS (*Virtual Reference Station*) (LANDAU *et al.*, 2002; ALVES, 2008).

Com o conceito de VRS, o usuário pode realizar posicionamento em qualquer região de abrangência da rede, tendo como referência uma estação base próxima que não existe fisicamente (SEJAS *et al.*, 2003). Cabe ainda acrescentar que no processo de geração da VRS algumas etapas devem ser seguidas, entre elas: resolução das ambiguidades da rede, cálculo das correções atmosféricas da rede, geração dos dados da VRS. Segundo Alves e Monico (2011) existe a possibilidade de gerar dados da VRS sem solucionar as ambiguidades, utilizando apenas o deslocamento geométrico (*DG*) e os modelos atmosféricos.

Essa pesquisa tem como área de estudos a rede GNSS/SP do estado de São Paulo, cuja geometria e densidade das estações podem possibilitar a aplicação do RTK em rede. Durante o desenvolvimento desse projeto, foram realizados testes utilizando diferentes modelos troposféricos a fim de analisar a importância da qualidade do atraso troposférico no RTK em rede. Dentre os modelos troposféricos analisados é importante destacar os de Previsão Numérica de Tempo (PNT), do ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*) e do CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e a função de mapeamento VMF1 (*Vienna Mapping Function*), cuja modelagem baseada em previsão numérica de tempo tem gerado bons resultados. Essas análises são de extrema importância, pois de acordo com Alves (2008) a qualidade da VRS gerada está diretamente relacionada com a qualidade do modelo atmosférico empregado.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é comparar os resultados advindos do emprego de diferentes modelos troposféricos no posicionamento em redes usando o conceito de estação de referência virtual.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Testar os modelos troposféricos de Hopfield, PNT/ECMWF (modelo global de Viena) e o PNT/CPTEC (modelo regional) em períodos críticos (seco e úmido) ao longo das quatro estações do ano;
- Analisar a contribuição das funções de mapeamento Niell e VMF1 para a troposfera no posicionamento baseado em redes GNSS da região brasileira;
- Avaliar a qualidade da VRS gerada com variação da configuração geométrica das estações da rede GNSS/SP.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A aplicação do método de posicionamento relativo em tempo real (RTK) tem se tornado uma prática cada vez mais comum entre usuários civis e científicos, principalmente por proporcionar posição acurada em tempo real.

Uma sequência de estudos relacionados com este método vem sendo desenvolvida ao longo dos anos no Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH) da UFPR. Freiburger Junior (2002) realizou testes utilizando a técnica RTK em diferentes estações de referência analisando os erros planimétricos, o tempo de fixação das ambiguidades e a confiabilidade do posicionamento. Constatou

melhores resultados em um raio de 10 km, para maiores distâncias o autor recomenda empregar dados de estações virtuais (VRS). PRADO e KRUEGER (2003) analisaram a acurácia nos posicionamentos diferenciais empregando as técnicas RTK e DGPS em linhas de base que variavam de 0,2 a 29 km, e obtiveram erros planimétricos abaixo de 2,5 m e menores que 7 cm no DGPS e RTK, respectivamente. Tanajura *et al.*, (2011) aplicou o DGPS e RTK para estudar as variações posicionais que ocorrem em sistemas costeiros dinâmicos. O RTK mostrou-se eficiente, com Erro Médio Quadrático (EMQ) de 0,003 m, 0,007 m e 0,149 m nas componentes, Norte (N), Este (E) e Altitude Elipsoidal (h).

No entanto, o RTK apresenta algumas limitações, como por exemplo, o efeito ionosférico à medida que a estação base se distancia da estação móvel. Uma metodologia viável para ampliar essa distância seria a aplicação do RTK em rede, ou seja, posicionamento em tempo real baseado em redes de estações de referência. Uma vantagem é a possibilidade de modelar os erros sistemáticos na área de abrangência da rede.

Existe um grande número de softwares comerciais para processamento de dados GPS que permitem apenas a correção empírica da troposfera, empregando, por exemplo, o modelo de Hopfield. Devido a isso, foi estudado, implementado e avaliado nessa pesquisa o modelo de PNT do ECMWF e a função de mapeamento VMF1 no sistema científico desenvolvido por Alves (2008). Alves (2008) também realizou testes preliminares com o método PPP aplicando o modelo de PNT/INPE e obteve resultados a nível centimétrico.

Algo que também justifica essa pesquisa é a existência e densificação das redes de estações de referência. No Brasil existem diversas redes de estações ativas, como por exemplo, a RBMC/RIBaC, a rede do Estado de São Paulo, além de redes privadas. Entretanto, considerando as redes públicas, a configuração geométrica da rede GNSS/SP, apesar de não ser ideal, permite a aplicação e estudo de modelos para correção da ionosfera e troposfera no posicionamento em redes em tempo real ou no modo pós-processado. A configuração da RBMC/RIBaC permite que as estações sejam utilizadas como base para o método de posicionamento relativo, porém algumas estações já disponibilizam o serviço NTRIP para posicionamento em tempo real.

Finalizando, esta pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico do país na área de Geodésia Espacial, ao estudar correções

atmosféricas na modelagem das principais fontes de erros sistemáticos que afetam a posição. Além da possibilidade de apoiar atividades como locação de obras, apoio geodésico e topográfico, georreferenciamento de imóveis rurais, agricultura de precisão, dentre outros.

### 1.2.1 Estruturação do Trabalho

O trabalho encontra-se ordenado em seis capítulos. O segundo capítulo é uma revisão geral sobre o GPS, onde são apresentadas as observáveis básicas do sistema e as principais fontes de erros que atuam no posicionamento em redes. Em seguida, são indicadas as redes de estações de referência a nível global e as regionais para a região do Brasil. Na seção 2.3 é feita uma revisão sobre o posicionamento RTK como introdução para a arquitetura RTK em rede com abordagem dos principais algoritmos para as correções diferenciais. Dentre esses algoritmos destaca-se como alvo de pesquisa nesse estudo o posicionamento a partir de dados de estações virtuais, abordado com detalhes na seção 2.3.3.

Na seção 2.4 são apresentadas as principais fontes de erro no posicionamento GPS. Dentre esses erros, o atraso ionosférico tratado com detalhes na seção 2.4.1.

A seção 2.4.2 apresenta alguns aspectos gerais da troposfera, como a sua estrutura, regiões geográficas da troposfera, o efeito troposférico e os principais modelos troposféricos (teóricos e de PNT).

No capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida, englobando a área de estudos, estações envolvidas, aquisição de dados, metodologia para gerar os dados de VRS nas quatro estações do ano e a análise de dados da VRS com a alteração na configuração geométrica das estações GPS em estudo.

O capítulo 4 mostra os resultados alcançados na pesquisa, segundo as estratégias propostas na metodologia. São feitas análises e algumas conclusões relacionadas aos resultados obtidos.

As conclusões e recomendações finais para demais trabalhos são apresentadas no quinto capítulo. No sexto e último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nesta pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 OBSERVÁVEIS GPS

Uma das principais funções dos satélites GPS é a de enviar sinais com informações de navegação para o usuário por meio do uso de receptores GPS (WELLS *et al.*, 1986; KRUEGER, 1994).

Os satélites GPS do bloco IIR transmitem sinais em duas frequências, também conhecidas como onda portadora, pertencentes à banda L, denominadas L1 ( $f=1575,42$  MHz e  $\lambda \cong 19,05$  cm) e L2 ( $f=1227,60$  MHz e  $\lambda \cong 24,45$  cm). Elas são geradas a partir da frequência fundamental ( $f_0 = 10,23$  MHz), multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Sobre as ondas portadoras são modulados os códigos C/A (*Coarse Aquisition*) e o código P (*Precise*) criptografado pelo código Y, disponíveis para os usuários de modo geral. Já o código P original está disponível apenas para os militares ou usuários autorizados pelo sistema (WELLS *et al.*, 1986; SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008).

Entre os anos de 2005 a 2009 foram lançados novos satélites do bloco IIR (M), uma versão modernizada do bloco IIR com introdução do código civil na portadora L2 (L2C). Atualmente, 7 satélites encontram em funcionamento (GPS, 2013).

O código C/A tem comprimento de onda de aproximadamente 300 m, transmitido a uma frequência de 1,023 MHz, sendo modulado apenas sobre a portadora L1, enquanto o código P criptografado, com comprimento de onda em torno de 30 m, encontra-se modulado nas duas portadoras (MONICO, 2008).

Atualmente, o sistema GPS está passando por um processo de modernização dos satélites do bloco IIR para o bloco IIF, com implementação da nova portadora, designada L5 ( $f=1176,45$  MHz e  $\lambda \cong 25,5$  cm), produto da frequência fundamental  $f_0$  por 115. A adoção da portadora L5 será uma contribuição para modelagem ionosférica, bem como, na resolução das ambiguidades instantâneas, melhorando a qualidade e confiança no posicionamento baseado em redes (ODIJK e TEUNISSEN, 2011). Com a modernização do sistema, um novo código civil,

denominado L2C, também está sendo implantado com o objetivo de reduzir o sinal ruído e aumentar a acurácia do posicionamento (LEICK, 2004; MONICO, 2008).

### 2.1.1 Observável Pseudodistância ( $PD_r^s$ )

As duas observáveis GPS fundamentais que permitem a obtenção da distância satélite-receptor no posicionamento terrestre são a pseudodistância e a fase da onda portadora. A pseudodistância é obtida através da medição do código, enquanto a medida de batimento da onda portadora é oriunda das ondas portadoras (SEEBER, 2003).

O tempo de transmissão do sinal multiplicado pela velocidade da luz no vácuo resulta em uma distância geométrica entre as antenas do satélite e o receptor. No entanto, devido ao não sincronismo entre o relógio dos satélites e do receptor, adicionado aos demais erros sistemáticos, resulta o termo pseudodistância (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO 2008).

Caso os relógios do satélite e do receptor fossem perfeitamente sincronizados entre si e com o tempo GPS, a pseudodistância representaria a distância real entre as antenas do satélite e o receptor. No entanto, isso não é possível devido à instabilidade dos osciladores. Os satélites dispõem de padrões atômicos de alta precisão, como os de *maser*, césio e rubídio, enquanto os receptores possuem osciladores de qualidade inferior, como o quartzo (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Os sinais GPS quando atravessam a atmosfera terrestre são afetados por diversas fontes de erro que prejudicam a trajetória do sinal (SEEBER, 2003). A representação matemática da pseudodistância ( $PD_r^s$ ) por meio do código é dada por:

$$PD_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r - dt^s] + I_r^s(t) + T_r^s(t) + dm_r^s(t) + \varepsilon_{PD_r^s}^s \quad (2.1)$$

onde:

- $PD_r^s$  é a pseudodistância entre o receptor ( $r$ ) e o satélite ( $s$ );
- $\rho_r^s$  é a distância geométrica entre o satélite ( $s$ ) no instante de transmissão do sinal e o receptor ( $r$ ) no instante de recepção do sinal, dado em metros;
- $c$  é a velocidade da luz no vácuo, em m/s;

- $dt_r$  é o erro de sincronismo entre o relógio do receptor e o tempo GPS no instante de recepção, dado em segundos;
- $dt^s$  é o erro de sincronismo entre o relógio do satélite com o tempo GPS no instante de transmissão, dado em segundos.
- $I_r^s$  é o erro causado pela refração ionosférica, em metros;
- $T_r^s$  é o erro causado pela refração troposférica, dado em metros;
- $dm_r^s$  é o erro devido ao efeito multicaminho, dado em metros;
- $\varepsilon_{PDr}^s$  erro de pseudodistância devido aos efeitos não modelados e aleatórios, dado em metros.

### 2.1.2 Observável Fase da Onda Portadora ( $\phi_r^s$ )

A fase da onda portadora  $\phi_r^s$  é igual à diferença entre a fase do sinal no satélite, recebido no receptor ( $\phi^s$ ), e a fase do sinal gerado no receptor ( $\phi_r$ ), ambas no instante de recepção  $t_r$ , dada em ciclos. A equação da fase da onda portadora ( $\phi_r^s$ ) pode ser descrita como (MONICO, 2008):

$$\phi_r^s(t) = f \left( \frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + [\phi^s(t_0) - \phi_r(t_0)] + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r}^s \quad (2.2)$$

onde:

- $f$  é a frequência nominal da fase, dado em Hz;
- $\phi^s(t_0)$  é a fase inicial no satélite, no instante ( $t_0$ ), dado em ciclos;
- $\phi_r(t_0)$  é a fase inicial no receptor, no instante ( $t_0$ ), dado em ciclos;
- $N_r^s$  é a ambiguidade da fase, dado em ciclos;
- $\varepsilon_{\phi_r}^s$  erro da fase da portadora devido aos efeitos não modelados e aleatórios, dado em metros.

Multiplicando-se ambos os lados da equação (2.2) pelo comprimento de onda da portadora ( $\lambda$ ), tem-se o valor da fase da portadora, em unidades de comprimento ( $\Phi_r^s$ ).

$$\Phi_r^s(t) = \rho_r^s(t) - I_r^s(t) + T_r^s(t) + dm(t) + c(dt_r - dt^s) + \lambda N_r^s(t) + \varepsilon_{\phi_r}^s \quad (2.3)$$

Onde:  $\Phi_r^s = \phi_r^s \lambda$

A medida da onda portadora está diretamente relacionada com a solução das ambiguidades ( $N_r^s$ ), que corresponde ao número de ciclos inteiros, deste o instante da primeira observação, entre as antenas do satélite e do receptor (FIGURA 1). Os receptores medem apenas a parte fracionária da onda portadora ( $\alpha$ ), restando determinar a contagem dos ciclos inteiros, ou comprimentos de onda que chegam ao receptor (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

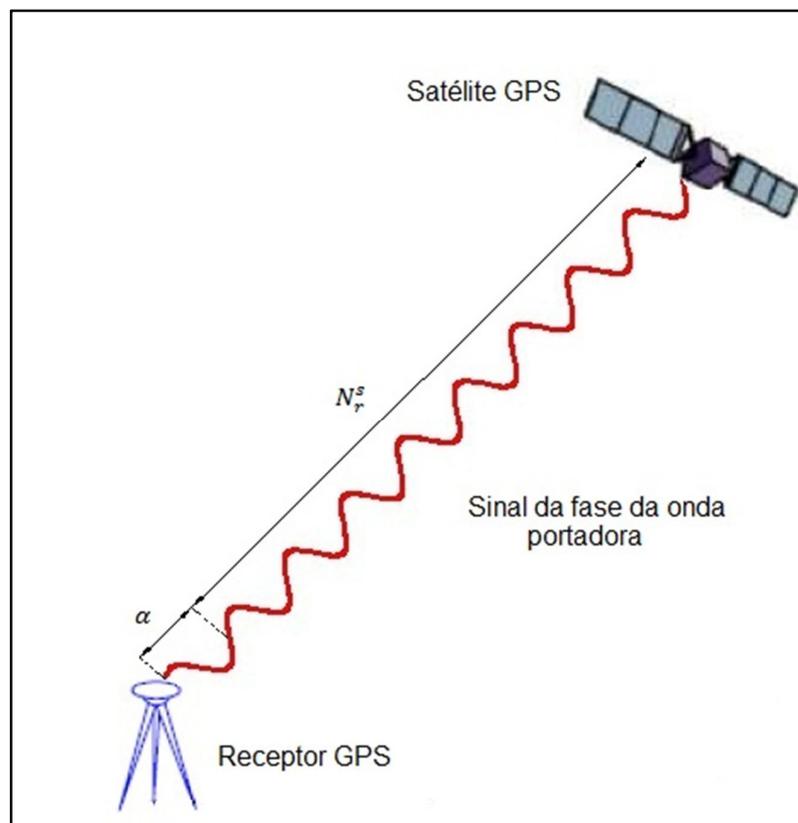


FIGURA 1 – CONTAGEM DE CICLOS INTEIROS PELAS ONDAS PORTADORAS ENTRE SATÉLITE-RECEPTOR  
 FONTE: ADAPTADO DE MONICO (2008)

## 2.2 REDES DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA

A quantidade de redes de estações de referência tem aumentado significativamente em diversas regiões do planeta nos últimos anos. A densificação e configuração das redes de estações ativas visam atender a comunidade civil, privada e científica no desenvolvimento de novas metodologias envolvendo posicionamento em tempo real ou pós-processamento. As redes podem ser globais como, por exemplo, a Rede IGS (*International GNSS Service*), continentais como é o caso da Rede SIRGAS, e, também podem ser nacionais ou regionais. No Brasil existe a rede nacional RBMC/RIBaC, a RBMC-IP, a rede ERDGPS (Estação de Referência DGPS) da Marinha, além das redes privadas. Existem também as redes regionais, como por exemplo a Rede GNSS/SP do Estado de São Paulo.

O IGS é um serviço científico internacional formado pela cooperação de mais de 200 agências em todo o mundo. Esse serviço voluntário tem como propósito apoiar atividades científicas geodésicas através da disponibilidade de produtos GPS e GLONASS (GNSS) para a comunidade civil em diversas regiões do planeta. Dentre os produtos oferecidos pelo IGS, encontram-se as efemérides ultrarrápidas, rápidas e as finais, parâmetros da rotação terrestre, coordenadas e velocidades relativas às estações de rastreamento, informações sobre os relógios dos satélites e estações de rastreamento e informações ionosféricas em arquivos no formato IONEX (IGS, 2012a).

O serviço conta atualmente com 441 estações (FIGURA 2), sendo que destas 373 encontram-se ativas (IGS, 2013).



Apesar das estações da RBMC/RIBaC estarem distribuídas ao longo dos estados brasileiros, a configuração e densidade das mesmas não permite realizar posicionamento centimétrico via RTK em rede, pois mesmo nas regiões mais densas o espaçamento entre as estações ainda não é ideal (ALVES, 2008).



FIGURA 3 – ESTAÇÕES GNSS DA RBMC/RIBAC  
FONTE: IBGE (2012)

Vale ressaltar que a configuração geométrica da rede é um fator extremamente importante no instante de planejamento e implantação das estações. A qualidade na determinação dos efeitos atmosféricos e o nível de erro na posição móvel estão diretamente relacionados à distribuição das estações na rede (SEEBER, 2003; ALVES, AHN e LACHAPPELLE, 2002).

Dentre as redes que fornecem dados em tempo real, a Marinha do Brasil dispõe do serviço designado Estações de Referência DGPS (ERDGPS), aos cuidados da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Esse serviço é destinado à transmissão de sinais de correção diferencial gratuitamente. Os principais usuários desta rede são os navegantes marítimos e alguns usuários limitados em terra (SOARES, 2005).

A rede ativa GNSS do Estado de São Paulo, denominada rede GNSS/SP, possui uma geometria e densificação que ainda não é ideal (as estações distam entre si de 100 a 300 km). Dessa forma, essa rede encontra-se fora dos padrões especificados segundo Fröhlich (1994), para levantamentos com acurácia recomenda-se distâncias de 50 a 70 km entre as estações. Contudo, no país, essa rede é que apresenta a melhor configuração, o que possibilita a aplicação da metodologia RTK em rede (FIGURA 4).

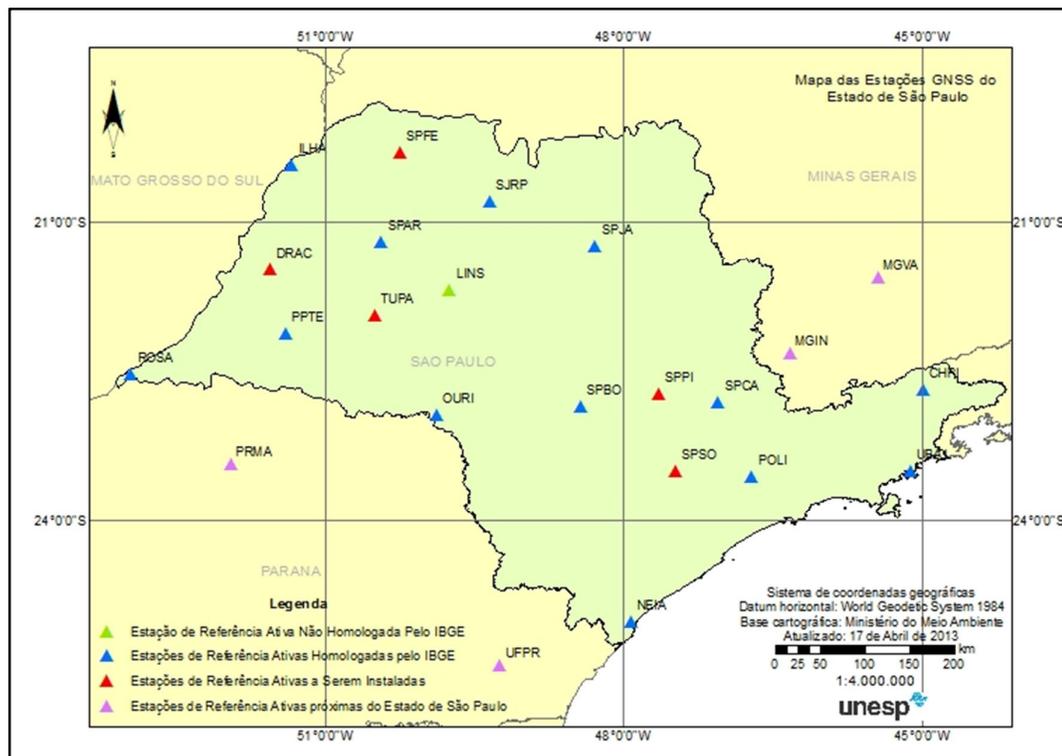


FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES QUE COMPÕE A REDE GNSS/SP  
 FONTE: GEGE (2013)

Na rede GNSS/SP, todas as estações GNSS transmitem dados em tempo real, via Internet, utilizando o protocolo NTRIP (BKG, 2012). Desta maneira, a comunidade civil e científica pode ser motivada a realizar posicionamento em tempo real ou pós-processado baseado em redes de estações de referência.

### 2.2.1 Principais Fontes de Erros Envolvidas no Posicionamento GNSS

No processo de realização de medidas, as observáveis GNSS estão sujeitas a erros de diversas naturezas, dentre eles destacam-se: os erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). A seguir são destacados os principais erros e efeitos sistemáticos que atuam sobre as observáveis GNSS (QUADRO 1).

Fontes de Erros ou Efeitos	Erros
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite
Propagação do sinal	Refração Troposférica Refração Ionosférica Perdas de ciclo Multicaminho ou sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena
Estação	Erro nas coordenadas Multicaminho Marés terrestres Movimento do Pólo Carga dos oceanos Pressão atmosférica

QUADRO 1 – FONTES ERROS OU EFEITOS QUE ATUAM SOBRE AS OBERVÁVEIS GNSS  
FONTE: MONICO (2008)

Ao analisar o comportamento e propagação destes erros dentro de uma rede, eles podem ser divididos em duas classes. Os erros dependentes da estação (o efeito de multicaminho, variações do centro de fase da antena e interferência de sinais) e os erros dependentes da distância (o erro de órbita dos satélites e os efeitos atmosféricos) (SEEBER, 2000).

Os erros dependentes da estação são reduzidos ou eliminados por meio da calibração de antenas ou modelos matemáticos específicos, enquanto os erros dependentes da distância variam conforme a linha de base formada entre as estações móveis e de referência (SEEBER, 2000). Em se tratando de VRS, tais erros são discutidos nas seções 2.4.1 e 2.4.2.

O QUADRO 2 apresentada a magnitude dos erros que afetam o posicionamento em rede.

Erros dependentes da estação			Erros dependentes da distância		
Varição do Centro de Fase	Efeito Multicaminho	Sinal Ruído	Órbita	Ionosfera	Troposfera
mm a 3 cm	mm a 3 cm	2 mm	0,5 a 2 ppm	0,1 a 50 ppm	0,1 a 3 ppm

QUADRO 2 – MAGNITUDE DOS PRINCIPAIS ERROS DEPENDENTES DA ESTAÇÃO E DA DISTÂNCIA

FONTE: SEEBER (2000)

No desenvolvimento dessa pesquisa, será dada maior ênfase aos efeitos atmosféricos (ionosfera e troposfera), descritos nas seções 2.4.1 e 2.4.2.

## 2.3 POSICIONAMENTO BASEADO EM REDES GNSS

As seções 2.3.1 e 2.3.2 descrevem o posicionamento RTK e o RTK em rede.

### 2.3.1 Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK)

No método de posicionamento relativo convencional é possível a obtenção de posicionamento acurado das coordenadas em campo, porém isso ocorre somente com o pós-processamento dos dados. Algumas atividades de engenharia seriam beneficiadas se coordenadas acuradas fossem obtidas em tempo real, como por exemplo, as obras de engenharia, levantamentos hidrográficos, levantamentos aéreos dentre outras atividades envolvendo navegação. De modo a atender essas exigências, desenvolveram-se nas últimas décadas algumas técnicas de posicionamento em tempo real, como o DGPS, o WADGPS (*Wide Area DGPS*), o RTK e RTG (*Real Time GIPSY*) (PRADO e KRUEGER, 2003).

Para a aplicação dessas técnicas na prática, é necessário que os dados coletados na estação de referência sejam transmitidos para o receptor móvel, via *link* de rádio ou algum outro meio de comunicação (KRUEGER, 1994; SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Salienta-se que as correções diferenciais transmitidas através de um enlace (*link*) de comunicação tem a função de reduzir a influência dos erros que atuam sobre essas técnicas (RTK, DGPS e etc), à medida que o comprimento da

linha de base aumenta (RIZOS *et al.*, 2002). Atualmente tem-se utilizado correções via internet, telefonia celular e satélites geoestacionários com objetivo de suprir as limitações de distância impostas pelas frequências de rádio (GAO *et al.*, 2002; MONICO, 2008).

A transmissão padrão dos dados no RTK, segundo o comitê RTCM ocorre via mensagem no formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), que se encontra nas versões 2.3, 3.0 e 3.1. A versão 2.3 permite a transmissão de dados ou correções entre uma estação referência base e uma estação móvel qualquer. A versão 3.0 foi projetada para levar em consideração as atualizações nos sistemas GPS e GLONASS, com a introdução dos sinais L5 e L2C, além de adequar outros sistemas em desenvolvimento, como é o caso do Galileo (SEEBER, 2003). Já a versão 3.1 é a versão mais atual e também incorpora correções em rede, contribuindo para o envio de correções no posicionamento baseado em redes GNSS (RTCM, 2006). Existem outros formatos, por exemplo, o formato da Trimble CMR ou CMR+ (*Compact Measurement Record Plus*).

A acurácia a nível centimétrico no posicionamento RTK é obtida a partir da fixação inicial das ambiguidades inteiras entre a estação base e móvel, ou seja, a operação de inicialização (RAMOS, 2007). Um dos procedimentos adotados é a técnica *on the fly* (OTF) que possibilita a resolução das ambiguidades em tempo real entre a base e o receptor móvel, quando este se encontrar em movimento (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

A técnica RTK tem como premissa básica o fato de que simultaneamente os mesmos satélites têm seus erros, dentro de certos limites, correlacionados (principalmente a ionosfera). No entanto, à medida que o comprimento da linha de base entre as estações de referência e a móvel (*rover*) aumenta os erros que anteriormente eram semelhantes, tornam-se cada vez mais decorrelacionados, acarretando uma degradação progressiva da precisão das coordenadas (PRADO e KRUEGER, 2003).

A técnica RTK baseia-se na transmissão das medições puras da fase da onda portadora ou das correções diferenciais da fase da portadora. No primeiro caso, a estação móvel forma duplas diferenças de fase (DDF), já na segunda, adota-se uma abordagem similar ao posicionamento DGPS. O benefício da utilização das DDF com relação às correções diferenciais de fase corresponde a uma modelagem mais apropriada ao levantamento, assim como da eliminação dos erros dos relógios, dos

satélites e dos receptores, fornecendo precisão centimétrica em tempo real (PRADO e KRUEGER, 2003; RAMOS, 2007).

A metodologia RTK torna-se inviável para linhas de base longas, ficando limitada em torno de 20 km ou até menos, se as condições ionosféricas não forem favoráveis (WANNINGER, 1999; RIZOS, 2003). Neste sentido, o uso de redes de estações de referência tem sido uma alternativa para minimizar a influência dos erros sistemáticos existentes e melhorar a acurácia do posicionamento em relação ao RTK. Além disso, a área de abrangência da rede é ampliada, facilitando a execução de levantamentos em campo (ALVES, 2008; LACHAPELLE e ALVES, 2002).

### 2.3.2 Posicionamento RTK em Rede

O conceito de redes de estações de referência GNSS possibilita melhorar significativamente a qualidade dos levantamentos em campo, elevando a confiabilidade do usuário (URAKAWA *et al.*, 2003).

Afonso (2006) afirma que para o sistema operar em perfeitas condições, é necessário uma boa comunicação entre as estações da rede e o centro de controle, como por exemplo, a baixa latência no envio do fluxo de dados. Monico (2008) esclarece que ao considerar a latência de 1 segundo, as duplas diferenças apresentam erros centimétricos.

O emprego dos dados de múltiplas estações de referência é uma realidade em muitos países, como na Alemanha, devido à busca de informações espaciais e posicionamento acurado em tempo real. O conceito de rede GNSS surgiu devido à necessidade de melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento e navegação (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003; ALVES 2008).

Para aplicar o RTK em rede são necessários no mínimo o uso de dados de três ou mais estações de referência no ajustamento para modelagem dos erros sistemáticos que atuam na área de cobertura (TALBOT *et al.*, 2002; SOARES, 2005). Wanninger (1999) esclarece que o uso de quatro ou mais estações possibilita mitigar por mínimos quadrados os erros sistemáticos atuantes na posição da estação, elevando o nível de confiança do usuário.

A arquitetura de uma rede RTK compreende um conjunto de estações de referência GNSS, um ou mais sistemas de comunicação (rádio, internet e etc.) para coleta e envio de correções diferenciais ao usuário e um centro de controle para gerenciamento dos dados (AFONSO, 2006) (FIGURA 5).

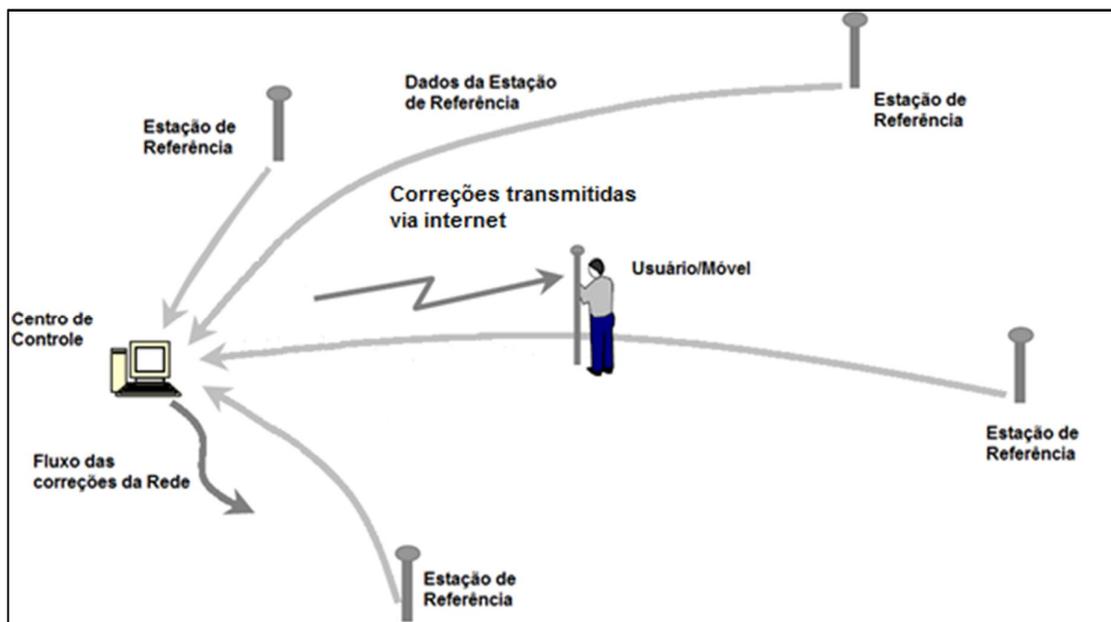


FIGURA 5 – COMPONENTES DA ARQUITETURA DO RTK EM REDE E FLUXO DOS DADOS  
 FONTE: ADAPTADO DE TALBOLT ET AL (2002)

Uma das principais vantagens da aplicação do conceito de posicionamento baseado em redes é a confiabilidade e disponibilidade do serviço. Caso uma ou mais estações que compõem a rede falhem ou sofrerem algum dano, é possível eliminar a contribuição das mesmas, sem prejudicar o restante do sistema, preservando assim sua integridade. Na técnica RTK tradicional, caso a estação de referência venha sofrer falhas, o usuário deverá retornar a campo ou processar os dados novamente, considerando o método de posicionamento absoluto PP (Posicionamento por Ponto) (FOTOPOULOS, 2000).

Outra vantagem do conceito de RTK em rede é a possibilidade de obter resolução rápida para as ambiguidades, ademais a modelagem dos erros dependentes da distância (por exemplo: erro de órbita e atmosfera) (WANNINGER, 1997). Dentre os erros dependentes da distância significativos podem-se citar os efeitos atmosféricos (ionosfera e troposfera) que podem ser modelados matematicamente a partir de um conjunto de estações permanentes para uma área de cobertura.

No entanto, o RTK em rede pode apresentar algumas desvantagens dependendo do método de correção utilizado devido a uma possível sobrecarga na transmissão dos dados ou a complexidade de implementação pelo usuário (FOTOPOULOS, 2000).

Para a aplicação do RTK em rede, há a necessidade de se estabelecer comunicação entre as estações que compõe a rede e o usuário. De acordo com RAMOS (2007) o enlace (*link*) de dados entre a estação de referência e a móvel irá depender do volume de dados a ser transmitido, do número de satélites rastreados, tipo e formato dos dados, requisitos de integridade e confiabilidade, condições de operação e comprimento da linha de base.

Atualmente, existe a possibilidade de utilizar a internet para o envio das correções independentemente da distância entre as estações e o usuário. Portanto, o protocolo NTRIP pode ser empregado na transmissão dos dados via internet.

Dentre os principais métodos de correção para aplicar o RTK em rede, estão: algoritmos de derivadas parciais, algoritmos de interpolação linear, algoritmo de ajustamento condicional, MAC (*Master-Auxiliary Concept*), FKP/ACP (em alemão *Flächenkorrekturparameter*) ou ACP (*Area Corrections Parameters*), RTX (*Real Time Extended*) e a VRS (*Virtual Reference Station*).

#### 2.3.2.1 Algoritmo de Derivadas Parciais

Esse algoritmo envolve o ajustamento de um conjunto de estações que compõem a rede, derivando parâmetros ou coeficientes através de um modelo geométrico específico representado neste caso por um plano inclinado (FIGURA 6). A modelagem dos erros correlacionados é baseada em uma função de derivadas parciais de primeira ordem, com o objetivo de gerar correções para o usuário dentro da região de cobertura da rede (FOTOPOULOS, 2000).

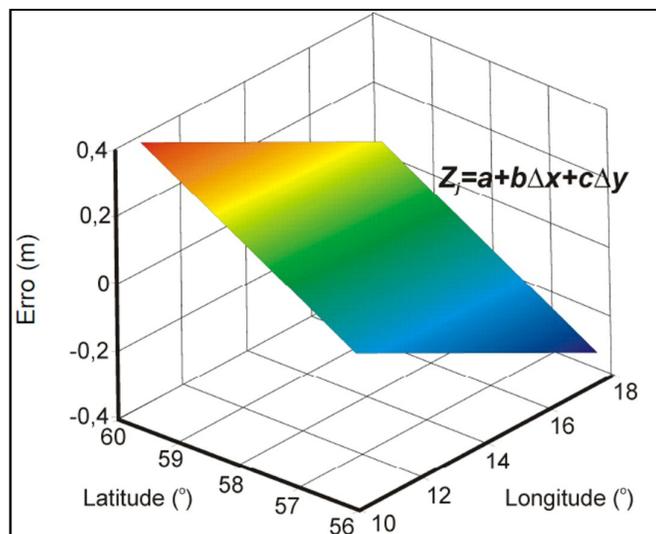


FIGURA 6 – MODELO DE PLANO INCLINADO (3 PARÂMETROS) PARA CORRELAÇÃO DOS ERROS ESPACIAIS  
 FONTE: Adaptado de FOTOPOULOS (2000)

### 2.3.2.2 Algoritmos de Interpolação

Nesse método os dados são coletados em todas as estações da rede e transmitidos para uma estação mestre, onde são gerados parâmetros de correção. Alguns dos interpoladores concentra-se na correção dos efeitos atmosféricos, por ser uma das maiores fontes de erro em posicionamento GNSS. Os parâmetros de correção ionosférica são implementados pelo usuário, os quais requerem o conhecimento da posição da estação mestre e as coordenadas aproximadas do usuário. Os principais algoritmos de interpolação empregados no RTK em rede encontram-se detalhados em Fotopoulos (2000), Gao e Li (1998), Odijk, Marel e Song (2000) e Wanninger (1995).

### 2.3.2.3 Algoritmos Envolvendo Ajustamento Condicional

O método de ajustamento condicional tem por objetivo gerar correções para a medida de fase da portadora, a partir da modelagem dos erros dependentes da

distância. As correções geradas são aplicadas nas observações originais dos receptores das estações de referência e do usuário e então as medidas de DDF (Dupla Diferença de Fase) são calculadas (RAQUET, 1998; FOTOPOULOS, 2000). Assim, é necessário que o usuário combine observações corrigidas do receptor com medidas corrigidas de apenas um receptor da estação de referência para formar as DDFs. Neste caso, como o usuário está utilizando observações corrigidas de erros sistemáticos, é esperado que o vetor das ambiguidades seja resolvido para distâncias maiores em relação à estação de referência (RAQUET, 1998; FOTOPOULOS, 2000; FORTES, 2002).

#### 2.3.2.4 MAC (*Master-Auxiliary Concept*)

O conceito de MAC apresentado por EULER *et al.* (2001) é um método desenvolvido pela empresa *Leica Geosystems* que consiste na transmissão de todos os dados relevantes referentes as correções da rede para o usuário de forma altamente compacta, em que as ambiguidades da fase são ditas niveladas<sup>1</sup> entre as diferentes estações GNSS da rede. Assim, quando as duplas diferenças são formadas as ambiguidades inteiras são resolvidas. Com as ambiguidades solucionadas é possível determinar os erros sistemáticos que atuam sobre a rede (EULER *et al.*, 2001; JANSSEN, 2009). Assim, são formadas e transmitidas mensagens RTCM 3.0 usando correções da estação mestre (*master*) e das estações auxiliares (BRAWN *et al.*, 2005). Desta maneira, o usuário simplesmente pode interpolar as correções geométricas e os efeitos atmosféricos para gerar as correções (FIGURA 7). Uma desvantagem deste método é a sobrecarga na transmissão de dados para o usuário (CHEN *et al.*, 2011). Os passos para utilizar o conceito MAC são apresentados a seguir:

- ✓ Os dados de observação das estações de referência são transmitidos para a unidade de processamento de rede;
- ✓ É realizada a solução das ambiguidades para todas as estações da rede, tornando comum o nível de ambiguidade entre elas;

---

<sup>1</sup> Diz-se ambiguidade nivelada, quando as ambiguidades inteiras para cada fase (par satélite-receptor) foram fixadas (EULER *et al.* 2001).

- ✓ A mensagem de transmissão encontra-se no formato padrão RTCM 3.0 contendo as correções da estação principal e das estações auxiliares;
- ✓ O usuário, por sua vez, realiza o posicionamento utilizando as informações transmitidas pela rede.

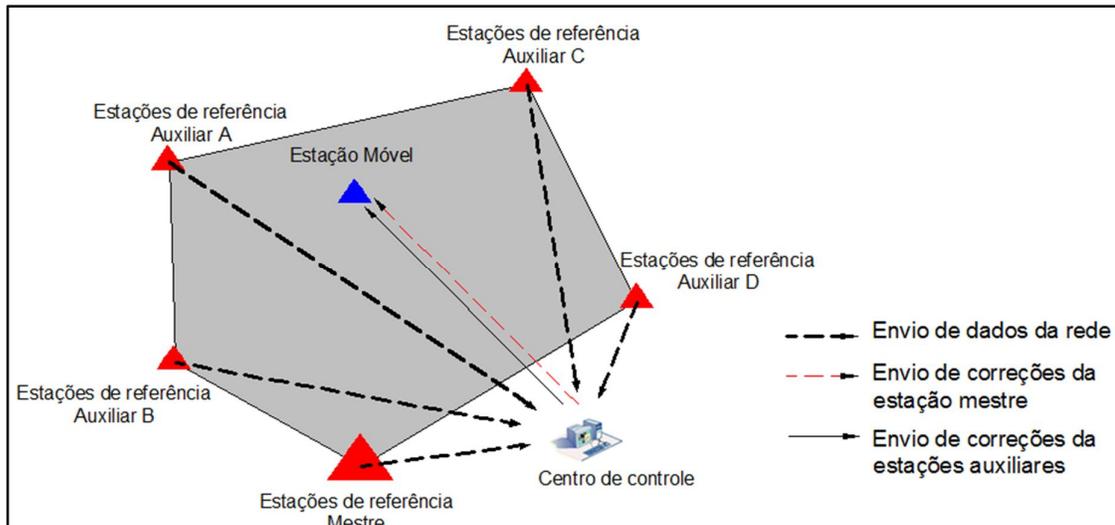


FIGURA 7 – GERAÇÃO DE CORREÇÕES DO MAC  
 FONTE: ADAPTADO DE BROWN *et al.*, (2005)

### 2.3.2.5 FKP/ACP

No conceito de FKP/ACP segundo Euler *et al.* (2001), o centro de controle da rede calcula para cada satélite coeficientes denominados FKP que cobrem os efeitos da ionosfera, órbita e troposfera para uma área limitada pela rede e para um determinado intervalo de tempo. Em seguida essas correções são enviados em tempo real para os usuários via mensagens RTCM para que este realize a interpolação dos erros para a posição em que ele encontra.

A implementação deste modelo, pressupõe-se que no mínimo três estações estão distribuídas em uma superfície, além da estação do usuário. O estado dos erros pode ser representado por um plano (SEEBER, 2003; SOARES, 2005), conforme a FIGURA 8.

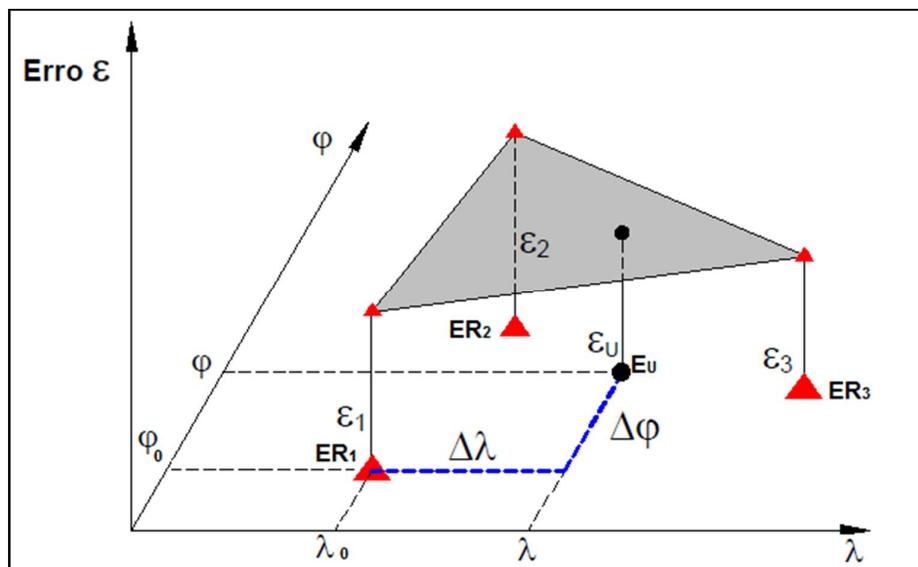


FIGURA 8 – GERAÇÃO DE CORREÇÕES FKP/ACP  
 FONTE: ADAPTADO DE SEEBER (2003).

Na Figura 8 podem ser observados três eixos, no primeiro eixo vertical são representados os valores dos erros ( $\varepsilon$ ), nos eixos horizontais as coordenadas geodésicas  $\varphi$  e  $\lambda$ , já as estações da rede são representadas por  $ER_1$ ,  $ER_2$ ,  $ER_3$  e a estação do usuário  $E_U$ . Os erros  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  são estimados para as estações de referência da rede, sendo os erros modelados segundo um plano na área de abrangência desta rede. O erro é modelado para a posição da estação do usuário  $\varepsilon_U$ . Este erro poder ser dado em função da variação das distâncias  $\Delta\varphi$  e  $\Delta\lambda$  a partir da estação  $ER_1$ .

### 2.3.2.6 Trimble RTX (*Real-Time Extended*)

O RTX é uma tecnologia desenvolvida pela Trimble, como resultado da combinação de um conjunto de técnicas que fornecem ao usuário posicionamento em tempo real a nível centimétrico, com taxa de inicialização inferior a 1 minuto na área selecionada (LEANDRO *et al.*, 2011). Nesse método, as fontes de erros que afetam o posicionamento são modelados ou estimados com dados de redes GNSS regionais (ionosfera e troposfera) ou globais (órbita dos satélites). Essa técnica realiza correções das principais fontes de erros que prejudicam o posicionamento, entre elas, a ionosfera, troposfera, erro de órbita dos satélites, variação no centro de

fase da antena, correção de marés, efeito do multicaminho dentre outros (CHEN *et al.*, 2011).

Os aspectos inovadores podem ser divididos em categorias (CHEN *et al.*, 2011), tais como:

- Capacidade de transmissão de dados em uma rede composta por 100 estações enviando dados por meio de satélites geoestacionários ou telefone móvel;
- Maior espaçamento entre as estações a fim de reduzir custos com manutenção e implantação de novas estações da rede;
- Possibilidade de usar órbitas precisas em tempo real com informações do relógio do satélite;
- Acurácia melhor que 4 cm nas correções enviadas pelos satélites em tempo real.

### 2.3.3 Estação de Referência Virtual

No conceito de VRS, dados virtuais para uma estação de referência são gerados próximo ao receptor do usuário. Ao invés de enviar correções da rede diretamente ao usuário, observações virtuais são geradas para uma posição próxima do mesmo (VOLATH *et al.*, 2000; LACHAPELLE e ALVES, 2002).

Para aplicar o conceito de VRS na prática, dados GNSS da rede de referência são enviados continuamente via rede de comunicação para o computador central, no centro de controle. O computador central, munido de softwares específicos utiliza os dados coletados para modelar as principais fontes de erro sistemático que prejudicam a acurácia do posicionamento, além de gerar correções para esses erros (ZHANG e ROBERTS, 2003).

É importante ressaltar que no processo de geração da VRS (FIGURA 9), o usuário deve enviar suas coordenadas aproximadas ao centro de controle, sendo que estas podem ser obtidas em Posicionamento por Ponto (PP), com GPS de navegação. Em se tratando de posicionamento em tempo real, normalmente a posição aproximada do usuário é enviada ao computador central na mensagem padrão NMEA (*National Marine Electronics Association*) via comunicação

bidirecional. Essa comunicação é realizada via internet ou utilizando telefones móveis via GSM (*Global System for Mobile Communications*). O centro de controle recebe as coordenadas da posição e responde enviando dados da VRS no formato RTCM, simulando uma estação de referência que não existe fisicamente nas proximidades do usuário (LANDAU *et al.*, 2002; AMOR e LUTTEMBERGER, 2004; VOLLATH *et al.*, 2000).

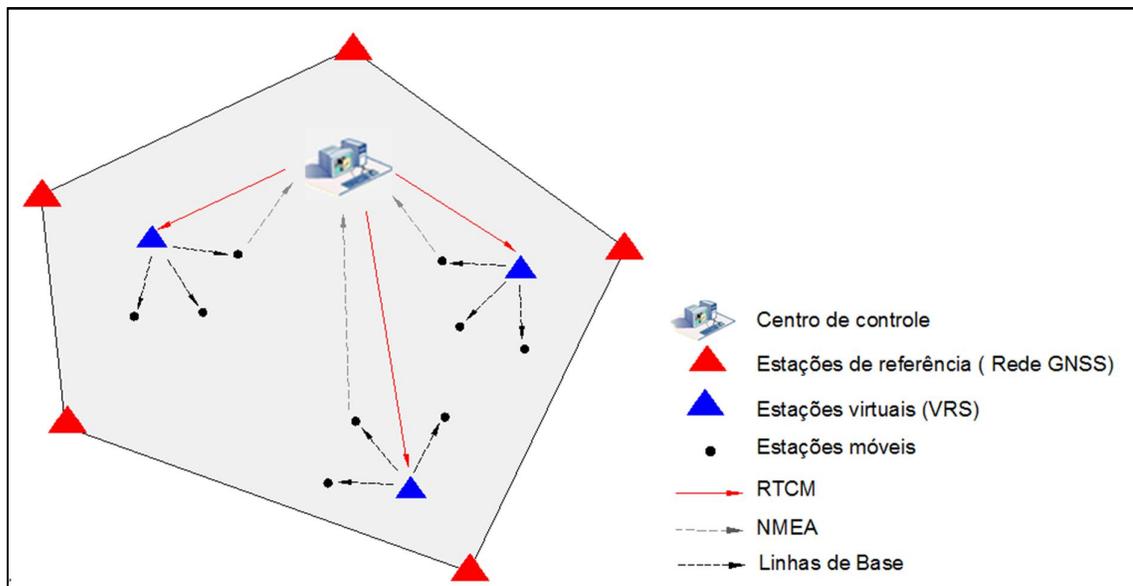


FIGURA 9 – CONCEITO DE VRS PARA POSICIONAMENTO RTK  
 FONTE: ADAPTADO DE LANDAU *et al.*, (2002)

SEJAS *et al.* (2003) realizou uma série de levantamentos GPS na Alemanha com o objetivo de verificar a acurácia do posicionamento entre estações de referência virtuais e estações móveis. No experimento realizado empregando o conceito de VRS foi obtida precisão melhor que 5 cm para as posições desejadas.

Além do conceito de VRS, existe o conceito VRC (*Virtual Reference Cell*) que possibilita o usuário se posicionar em qualquer região da rede. Uma grade de estações virtuais é gerada na região da rede, permitindo que o usuário desloque-se em várias posições, de forma que sua posição sempre estará associada a uma célula da grade. Neste método, o usuário se comunica com o centro de controle da rede por meio de link unidirecional (ZHANG e ROBERTS, 2003).

O Quadro 3 a seguir faz comparação entre os principais métodos de correção do RTK em rede .

Características	VRS	MAC	RTX	FKP
<b>Link</b>	Comunicação bidirecional ou unidirecional para grid.	Pode ser comunicação unidirecional ou bidirecional.	Unidirecional a nível global.	Pode ser comunicação unidirecional.
<b>Receptor</b>	RTK convencional	RTK convencional do fabricante (Leica)	Receptores modernos do fabricante (Trimble)	RTK convencional
<b>Padrões/RTCM</b>	Mensagem no formato padrão RTCM	Mensagem no formato padrão RTCM	Mensagem no formato padrão RTCM	Mensagem no formato padrão RTCM ou CMR
<b>Acurácia</b>	Todos podem atingir acurácia milimétrica, ressaltando que o nível de acurácia depende da densidade das estações da rede, bem como das condições atmosféricas.			
<b>Integração e Pesquisa</b>	Dependência do software do fabricante (sistema <i>black box</i> ), não permitindo a implementação de novas correções (modelos, testes e etc).	Disponibiliza informações "brutas" acerca das correções, logo, pode-se implantar algoritmos no rover.	Dependência do software do fabricante já embutidos nos receptores específicos.	Dependência do software do fabricante já embutido nos receptores específicos.
<b>Deslocamento do receptor móvel</b>	A acurácia tende a degradar à medida que o receptor móvel se afasta da posição da VRS. Assim, é necessário calcular uma nova estação virtual, uma solução seria adoção de células VRS.	Quando o rover se distancia, no modo broadcast, pode ser necessário o cálculo de novas estações auxiliares e principais.	Haverá problemas quando o usuário se deslocar fora de uma área de cobertura, que está sendo utilizada. Isso faz com que a precisão seja degradada.	Haverá problemas quando o usuário se deslocar fora do plano de cobertura.
<b>Determinação da Estação de Referência</b>	O receptor móvel envia sua posição aproximada no formato padrão NMEA e o centro de controle gera a VRS como estação de referência nesta posição.	No formato broadcast, o usuário seleciona manualmente. No modo automático, o rover envia sua posição aproximada via NMEA e a estação de referência é escolhida automaticamente.	Não é utilizada estação de referência, apenas a rede como um todo.	O centro de controle calcula para cada satélite coeficientes FKP (engloba efeitos ionosféricos, troposféricos, órbita) a serem enviados e interpolados pelo rover a uma superfície de atuação.

QUADRO 3 – COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CORREÇÃO NO RTK EM REDE

### 2.3.3.1 Geração de Dados de Estação de Referência Virtual

No processo de geração dos dados da VRS, as medidas realizadas na estação de referência real devem ser transformadas para a posição da VRS, de maneira que todos os termos da equação de observação dependentes da posição devem ser corrigidos para a nova localização da VRS (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008). Inicialmente é selecionada a estação de referência da rede situada mais próxima da VRS, como estação base<sup>2</sup> (HU *et al.*, 2003; ALVES, 2008). As observáveis da VRS são geradas com base nas observáveis da estação base, fase e pseudodistância, incluindo os efeitos atmosféricos modelados (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008; ALVES, 2008).

A equação (2.5) representa os dados de fase gerados para o satélite ( $s$ ) na posição da VRS, dada por (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008):

$$\Phi_v^s(t) = \Phi_b^s(t) + \frac{1}{\lambda}(\Delta\rho^s(t) + \Delta I^s(t) + \Delta T^s(t)), \quad (2.5)$$

onde:

- $\Phi_v^s(t)$  é a observável de fase gerada na posição da VRS para o satélite ( $s$ ), em ciclos;
- $\Phi_b^s(t)$  é a observável de fase da estação base para o satélite ( $s$ ), em ciclos;
- $\lambda(t)$  é o comprimento de onda, em metros;
- $\Delta\rho^s(t)$  é a correção geométrica para o satélite ( $s$ ), também conhecida como deslocamento geométrico ( $DG$ ), em metros;
- $\Delta I^s(t)$  é a correção ionosférica para o satélite ( $s$ ), em metros;
- $\Delta T^s(t)$  é a correção troposférica para o satélite ( $s$ ), em metros.

Já a equação (2.6) apresenta a pseudodistância para o satélite ( $s$ ) na posição da VRS no tempo ( $t$ ), dada por (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008):

$$PD_v^s(t) = PD_b^s(t) + (\Delta\rho^s(t) + \Delta I^s(t) + \Delta T^s(t)) \quad (2.6)$$

---

<sup>2</sup> Estação base neste contexto refere-se à estação da rede cuja posição se encontra mais próxima da posição da VRS ou do usuário da estação.

Onde:

- $PD_v^s(t)$  é a observável de pseudodistância gerada na posição da VRS para o satélite ( $s$ ), em metros;
- $PD_b^s(t)$  é a observável de pseudodistância da estação base para o satélite  $s$ , em metros;

As correções geométricas são determinadas pelo cálculo do deslocamento geométrico entre a estação base da rede e a posição da VRS (HU *et al.*, 2003).

Assim sendo,

$$\rho_b^s(t_b) = \|X^s - X_b\|, \quad (2.7)$$

$$\rho_v^s(t_v) = \|X^s - X_v\|, \quad (2.8)$$

onde:

- $\rho_b^s(t)$ ,  $\rho_v^s(t)$  são a distância geométrica entre o satélite e a estação base e a VRS respectivamente (m);
- $t_b$  é o tempo de transmissão do sinal para a estação base, em segundos (s);
- $t_v$  é o tempo de transmissão do sinal para a VRS, em segundos (s);
- $X^s$  é a posição do satélite (m);
- $X_b$  e  $X_v$  são as posições da estação de referência base e da VRS, respectivamente (m).

O deslocamento geométrico,

$$\Delta\rho = \rho_v^s(t_r) - \rho_b^s(t_r) \quad (2.9)$$

deve ser aplicado com o objetivo de deslocar as observações de fase e pseudodistância da estação base para a posição da VRS (HU *et al.*, 2003). A FIGURA 10 mostra o deslocamento geométrico entre a estação base e a estação de referência.

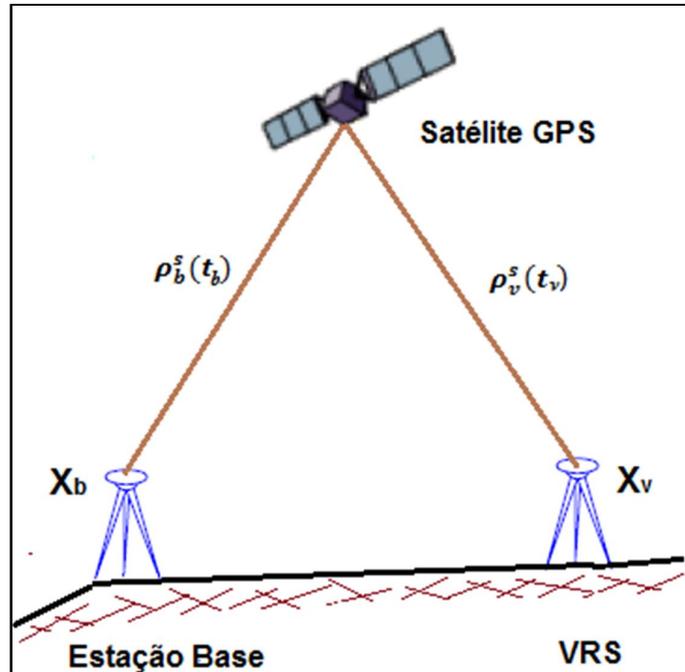


FIGURA 10 – DESLOCAMENTO GEOMÉTRICO ENTRE A ESTAÇÃO BASE E A VRS  
 FONTE: ADAPTADO DE ALVES (2008)

Após aplicar o deslocamento geométrico, todas as correções referentes à ionosfera e troposfera também devem ser transferidas da estação base para a VRS, além dos erros residuais provenientes da rede (ALVES, 2008).

A correção do efeito ionosférico e atraso troposférico podem ser obtidos a partir de diferentes modelos. Os erros orbitais são reduzidos automaticamente nos dados da VRS, não apenas devido ao uso das efemérides precisas, mas também porque esses erros são absorvidos nos resíduos do ajustamento (MAREL, 1998).

O erro do relógio do receptor e as ambiguidades serão introduzidos aos dados da VRS. Pode-se escolher o relógio de um receptor ou a média de todos os receptores (MAREL, 1998).

Os erros provenientes do multicaminho não são modelados (MAREL, 1998). SEEBER (2003) esclarece que para cada estação envolvida no ajustamento da rede devem ser utilizadas técnicas para minimizar o efeito multicaminho, como por exemplo, evitar objetos refletoras ao redor das antenas dos receptores, calibração de antenas, materiais atenuadores, aplicação de filtros computacionais ou uso de antenas tipo *choke ring* ou *pinwheel* (LEANDRO, 2009).

## 2.4 PRINCIPAIS EFEITOS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO EM REDES

As seções 2.4.1 e 2.4.2 abordam as principais fontes de erros no posicionamento baseado em redes GNSS.

### 2.4.1 Efeito Ionosférico

A ionosfera é composta por elétrons livres e abrange uma camada com espessura que varia de 50 até 1000 km acima da superfície terrestre (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). É considerado um meio dispersivo, ou seja, a refração ionosférica tem grande influência sobre as ondas eletromagnéticas transmitidas pelos satélites. As portadoras são afetadas de maneira diferente em relação ao código modulado sobre elas. Enquanto a portadora sofre uma aceleração, o código modulado sofre um retardo (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

A geração de íons e elétrons é proporcional à intensidade da radiação solar a densidade dos gases. A ionosfera é subdividida em regiões denominadas D, E, F1 e F2, as regiões que se destacam são a F1 e F2. A região F1 combinada com a região E causa atraso ionosférico do sinal GPS em até 10%, enquanto a região F2 produzida pela ionização do gás oxigênio é a região mais densa e que sofre maiores variações provocando erro sistemático no posicionamento GNSS (SEEBER, 2003). O QUADRO 4 apresenta as principais características das camadas que compõem a ionosfera. O estado da ionosfera é descrito pela densidade de elétrons ( $n_e$ ) com unidade em (el/cm<sup>3</sup>).

Camada		D	E	F1	F2
Altura de domínio	km	60 - 90	90 - 140	140 - 200	200 - 1000
Densidade de elétrons $n_e$ (el/cm <sup>3</sup> )	Dia	10 <sup>2</sup> a 10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	5x10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
	Noite	-	2x10 <sup>3</sup>	5x10 <sup>4</sup>	3x10 <sup>5</sup>

QUADRO 4 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO IONOSFÉRICA  
FONTE: SEEBER (2003)

A ionosfera é considerada a maior fonte de erro sistemático no posicionamento GNSS (SEEBER, 2003; CAMARGO, 1999). O erro ionosférico é diretamente proporcional ao TEC (*Total Electron Content* – Conteúdo Total de Elétrons), e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal (SEEBER, 2003). O TEC representa o número de elétrons livres contidos em uma coluna de seção de  $1\text{m}^2$  que se estende ao longo da trajetória formada entre o satélite ( $s$ ) e a antena do receptor ( $r$ ). O erro na fase ( $I_{fr}^s$ ) e na pseudodistância ( $I_{gr}^s$ ), são dados por (LEICK, 1995).

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC, \quad (2.10)$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (2.11)$$

A equação (2.10) para fase e equação (2.11) para código representam os erros sistemáticos ionosféricos na fase e pseudodistância com mesma magnitude, porém com sinais contrários. A unidade do TEC é dada em elétrons por metro quadrado ( $\text{el}/\text{m}^2$ ) e o valor 40,3 é uma constante.

A FIGURA 11 retrata o comportamento da refração na camada ionosférica.

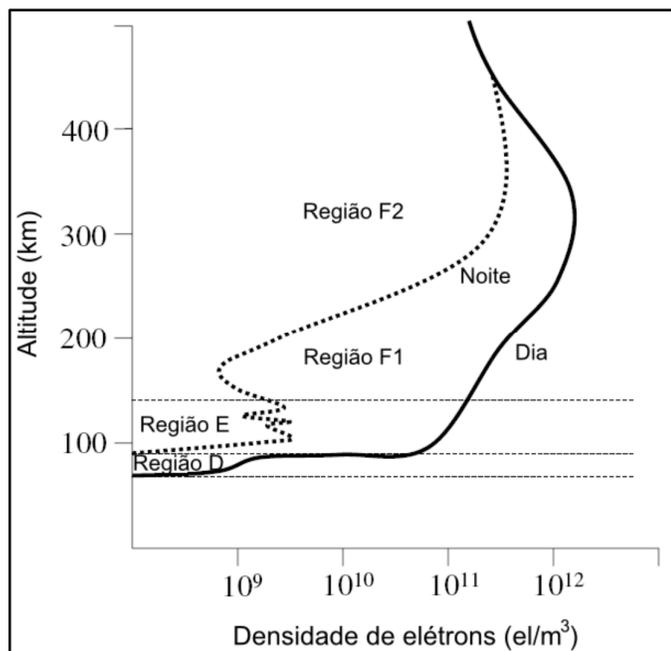


FIGURA 11 – SUBDIVISÃO DA IONOSFERA  
 FONTE: CAMARGO (1999)

A variação do TEC ao longo do ano está relacionada com o movimento diurno do sol, estação do ano, ciclo solar, localização geográfica do receptor e campo magnético da Terra (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003). O movimento diurno do sol está diretamente ligado à variação da luminosidade ao longo do dia, ou seja, variação da radiação solar diária. Em regiões de baixa latitude esse efeito tem um segundo pico que ocorre por volta da meia noite, com maior importância nos períodos de verão, equinócios e alta atividade solar (SEEBER, 2003). As estações do ano influenciam a variação do TEC, devido a mudança do ângulo zenital do sol e da intensidade do fluxo de ionização, responsável pelas variações sazonais. Experimentos realizados por CAMARGO (1999) e MATSUOKA (2007) mostraram que os efeitos da ionosfera são maiores nos equinócios, enquanto que, nos solstícios, eles são menores.

As variações solares ocorrem em ciclos compostos por períodos de aproximadamente onze anos, estão associados às ocorrências de manchas solares, proporcionais ao TEC, anomalia equatorial e cintilação (KLOBLUCHAR, 1996; CAMARGO, 1999).

O monitoramento da ionosfera é uma atividade de grande importância para países situados próximos ao Equador e em latitudes baixas, devido a complexidade na determinação do efeito (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; CAMARGO, 2009). Diversos estudos sobre a variação do TEC no Brasil, bem como do impacto da ionosfera no posicionamento com GPS, têm sido realizados nos últimos anos (CAMARGO, 1999; SEEBER, 2003; MATSUOKA, 2003; MATSUOKA e CAMARGO, 2004; MATSUOKA, 2007).

#### 2.4.1.1 Modelos para Ionosfera

Atualmente diversos centros de pesquisa que desenvolvem mapas da ionosfera para redução do efeito da ionosfera sobre as observáveis GPS. Na Europa o CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*) emprega harmônicos esféricos na descrição regional e global da ionosfera. Entretanto, esses modelos atendem os países do hemisfério norte, considerados inadequados para os países do hemisfério sul (CAMARGO, 1999). Assim, a Faculdade de Ciências Astronômicas e Geofísicas

da Universidade Nacional de La Plata na Argentina desenvolveu um modelo global para ionosfera, designado LPIM (*La Plata Ionospheric Model*). Esse modelo baseado em harmônicos esféricos é gerado com resolução espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$  em latitude e longitude, e resolução temporal de 1 hora (AZPILICUETA *et al.* 2006).

O grupo de trabalho da ionosfera do IGS, formado em 1998, teve formação inicial de cinco centros de análise associados designado IAACs (IGS Ionosphere Associate Analysis Centers): CODE, ESOC (*European Space Operations Centre*), NACan/EMR (*Natural Resources Canada, Ottawa, Ontário, Canada*), JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e UPC (*Polytechnical University of Catalonia*). Atualmente a instituição canadense não participa do grupo de trabalho (IGS, 2012b; PAJARES, 2003). Cada instituição do IAAC apresenta técnicas específicas para o cálculo dos mapas que combinadas geram produtos combinados (FIGURA 12). O produto final é disponibilizado através de mapas no formato IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*) disponibilizados pelo IGS. Todas as soluções individuais são geradas com resolução temporal de 2 horas e com a mesma resolução espacial de  $5^\circ \times 2,5^\circ$  em longitude e latitude, respectivamente (PAJARES, 2003).

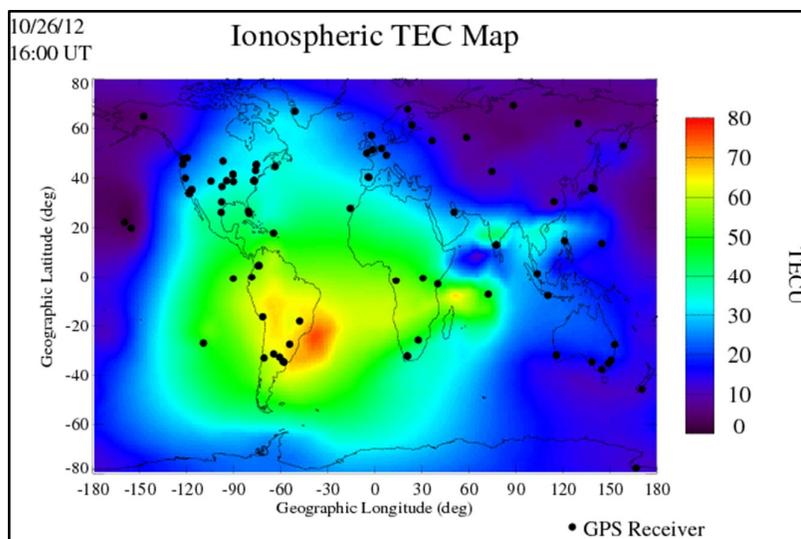


FIGURA 12 – MAPA GLOBAL DA IONOSFERA (GIM)  
FONTE: IGS (2012)

Outro modelo global da ionosfera empregado pela comunidade científica é o modelo ionosférico de Klobuchar baseado em formulação empírica. Este modelo é baseado nas medidas do TEC, o que permite estimar o tempo de atraso do sinal ao passar pela ionosfera (KLOBLUCHAR, 1987).

Além dos modelos ionosféricos supracitados, existem também modelos que empregam a série de Taylor, maiores detalhes em Chen *et al.*, (2004). Devido a algumas limitações da série de Taylor, Schaer *et al.*, (1998) propôs o desenvolvimento de um modelo baseado em harmônicos esféricos, permitindo a geração de modelos regionais e globais da ionosfera.

No Brasil, pesquisadores têm empenhado esforços na estimação do efeito da refração ionosférica, bem como o seu comportamento. A FCT/UNESP vem desenvolvendo uma sequência de estudos relacionados com a geração de modelos regionais que atendam a América do Sul. Camargo (1999) desenvolveu o modelo regional da ionosfera denominado Mod\_Ion que consiste em gerar correções ionosféricas para receptores GPS, no modo pós-processado. A partir do Mod\_Ion foi desenvolvido o Mod\_Ion\_FK, com aplicação do algoritmo filtro de Kalman, possibilitando aplicações em tempo real (AGUIAR, 2005).

Outro modelo explorado pela comunidade científica é a Grade Ionosférica (GI). Aguiar (2010) desenvolveu um método para gerar uma GI com o objetivo de melhorar a acurácia em aplicações de posicionamento preciso e navegação pelo GNSS. Também existe o modelo tomográfico baseado em funções, que é construído a partir de um conjunto de funções de harmônicos esféricos e funções ortogonais empíricas (*Empirical Orthogonal Functions* - EOFs). Já no modelo tomográfico baseado em células 3D, a ionosfera é dividida em células 3D cujo tamanho é  $5^\circ \times 2^\circ$  (graus) e os limites das altitudes são de 60, 740 e 1420 km (COLOMBO *et al.*, 1998). Nessas células assume-se que a densidade de elétrons é constante. Maiores detalhes desse modelo são apresentados em Gao e Liu (2002) e (LIU, 2004).

Em geral, o efeito ionosférico é relevante mesmo em condições ionosféricas moderadas em latitudes médias com mínima presença de mancha solar (WANNINGER, 1995). Uma forma de eliminar o efeito de primeira ordem da ionosfera é utilizar receptores GPS de dupla frequência, visto que a refração da ionosfera é proporcional à frequência do sinal (Equação 2.10 e 2.11). Dessa maneira, permite a aplicação da combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*) (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Dentre os modelos mais utilizados, a maioria emprega o conceito de Pontos Ionosféricos (*IPP – Ionospheric Pierce Point*) (FIGURA 13), sendo esses pontos formados pela intersecção do vetor satélite-receptor (estações  $R_1, R_2, R_3, R_4$  e  $R_5$ )

com a camada infinitesimal da ionosfera localizada entre 350 e 450 km de altitude (MAREL, 1998; ODJIK, 2000).

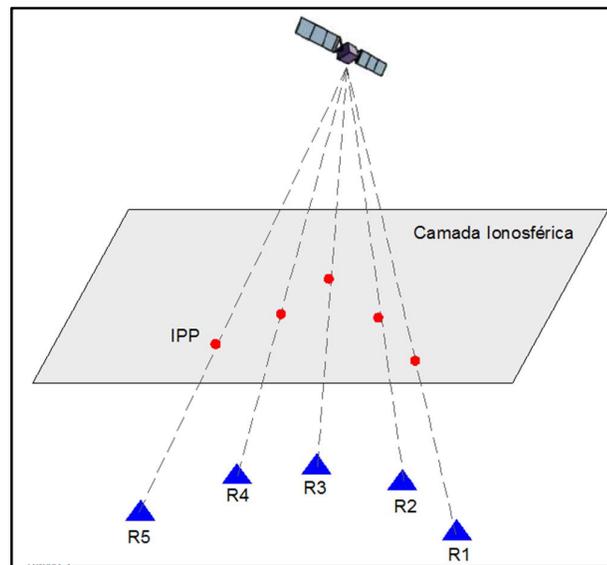


FIGURA 13 – MODELAGEM DA IONOSFERA EM UMA CAMADA INFINITESIMAL  
 FONTE: ADAPTADO DE ALVES (2008)

#### 2.4.2 Refração Troposférica

A camada inicial da atmosfera a partir da superfície terrestre é denominada troposfera (FIGURA 14). Essa camada atmosférica se estende desde a superfície terrestre até aproximadamente 15 km de altitude (KIRCHHOFF, 1991). A temperatura diminui com o aumento da altitude, e o gradiente de temperatura varia em função da altitude, estação do ano e da localização geográfica. Quando acrescida da parte baixa da estratosfera, forma uma única região, denominada atmosfera neutra, uma das maiores fontes de erros sistemáticos no posicionamento GPS (SAPUCCI, 2001; MONICO, 2008). O efeito provocado pelos elementos que compõem essa camada é denominado atraso troposférico ou refração troposférica.

A troposfera comporta-se como um meio não dispersivo para sinais com frequências na banda L, abaixo de 30 GHz, como é o caso das frequências L1, L2 e L5 do GPS (KRUEGER, 1994; SEEBER, 2003).

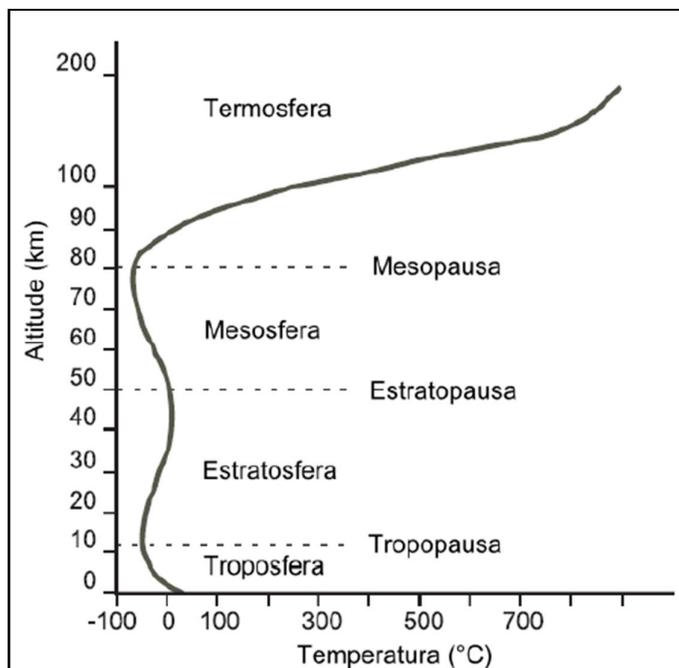


FIGURA 14 – PERFIL VERTICAL DA ATMOSFERA  
 FONTE: ADAPTADO DE KIRCHHOFF (1991)

Sapucci (2001) esclarece que o atraso troposférico é causado pela variação do índice de refração ( $n$ ) dos gases que compõe a troposfera. Devido a essa variação a trajetória do sinal sofre uma leve curvatura quando comparada à sua trajetória geométrica entre um satélite e o usuário em terra (Figura 15). Logo, conclui-se que o índice de refração provoca mudanças na direção e velocidade dos sinais eletromagnéticos.

A FIGURA 15 ilustra o comportamento da distância geométrica em relação ao sinal refratado, devido às variações do índice de refração atmosférico.

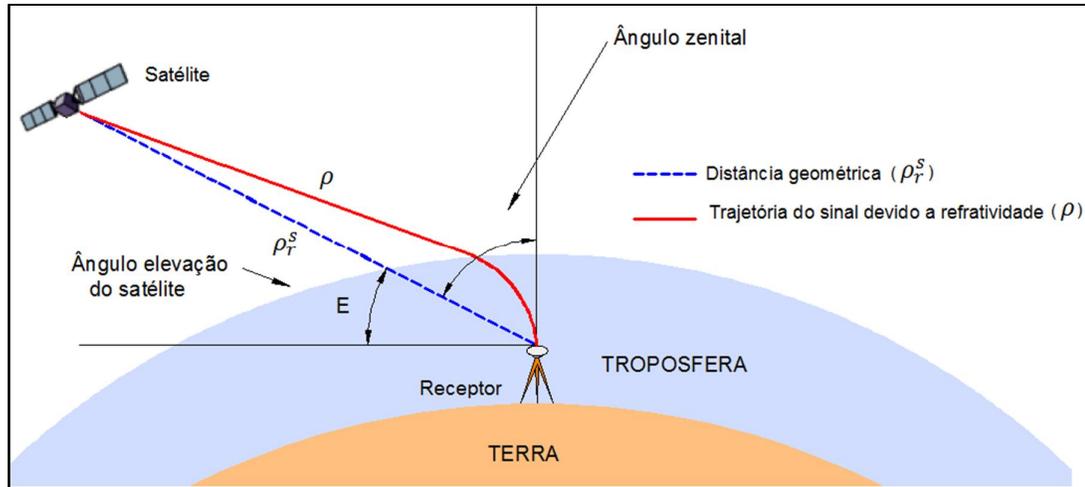


FIGURA 15 – ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO NO SINAL GPS NA ATMOSFERA, NA DIREÇÃO SATÉLITE – RECEPTOR  
 FONTE: ADAPTADO DE SAPUCCI (2001)

O atraso troposférico ( $D_{TROP}$ ) ao longo da trajetória entre o satélite e o receptor é definido como (LEICK, 2004; SAPUCCI, 2001):

$$D_{TROP} = \rho - \rho_r^s = \int n ds - \int ds = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N ds \quad (2.12)$$

Onde:

- $D_{TROP}$  é o atraso troposférico;
- $\rho$  é a trajetória real percorrida pelo sinal;
- $\rho_r^s$  é a trajetória geométrica do sinal;
- $N$  é a refratividade atmosférica.

Como ( $n$ ) possui valores muito próximos da unidade, Sapucci (2001) afirma ser conveniente expressar o atraso troposférico empregando a grandeza refratividade do ar ( $N$ ).

O atraso troposférico zenital total (ZTD) do sinal GPS é obtido pela soma das componentes úmida (ZWD) e hidrostática (ZHD). A componente úmida é mais difícil de modelar devido a forte variação de vapor d'água, e ela representa apenas 10% da refração total. Já a componente hidrostática é descrita com acurácia de  $\pm 1\%$  por modelos existentes. O atraso zenital total varia aproximadamente de 0,80 a 2,30 m. Seeber (2003) explica que o erro provocado pela refração troposférica sobre uma observável GPS pode aumentar cerca de 10 vezes à medida que se aproxima do horizonte (máscara de elevação de  $10^\circ$ ), ou seja, aproximadamente 30 m.

A componente hidrostática é influenciada pela presença de oxigênio e nitrogênio no meio, além da temperatura, latitude e pressão atmosférica local. A componente úmida sofre mais variações que a componente hidrostática (seca), devido à influência do ciclo de vapor d'água na atmosfera (SAPUCCI, 2001; SEEBER, 2003).

Na prática, adotam-se observações de satélites realizadas com máscara de elevação de 10° ou 15°(graus), conforme especificações da Norma Técnica do INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) (INCRA, 2010). Abaixo deste valor as observações estão sujeitas a erros significativos no modelo (KRUEGER, 1994; MONICO, 2008).

#### 2.4.2.1 Modelos para Troposfera

Os modelos globais cobrem toda a superfície do planeta, enquanto os regionais possuem melhor resolução espacial, atendendo uma região específica do globo (SAPUCCI *et al.*, 2003).

##### 2.4.2.1.1 Modelo de Hopfield

No modelo troposférico global empírico de Hopfield, desenvolvido em 1969, o atraso troposférico é dado em função da temperatura, pressão, medidas na superfície e da altura da camada atmosférica que exerce influência sobre os sinais eletromagnéticos da área de interesse (SAPUCCI, 2001). Esse modelo é dado pelas seguintes equações (SEEBER, 2003):

$$D_{ZH} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{P_0}{T_0} H_H \quad (2.13)$$

$$D_{ZW} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{4810 e_0}{T_0^2} H_W \quad (2.14)$$

onde:

- $D_{ZH}$  é o atraso troposférico zenital da componente hidrostática;
- $D_{ZW}$  é o atraso troposférico zenital da componente úmida;
- O índice “0” representa medidas realizadas na superfície terrestre;
- A temperatura ( $T$ ) é dada em *Kelvin* e a pressão ( $P$ ) em *hPa*;
- $H_H$  e  $H_W$  representam as alturas das camadas atmosféricas das componentes hidrostática e úmida, respectivamente em metros ( $m$ ).

$H_H$  e  $H_W$  são dados por:

$$H_H = 40,136 + 148,72(T_0 - 273,16), \quad (2.15)$$

$$H_W = 11000 \text{ m}$$

O valor da componente úmida  $H_W$  na equação 3.14 é referente aos locais próximos ao Equador, à medida que se aproxima dos polos esse valor pode ser de 7000 m (SAPUCCI, 2001). Então, conclui-se que à medida que se aproxima dos polos a altura da componente úmida tende a diminuir, alterando a fórmula anterior para a seguinte equação:

$$H_W = 11000 - 44,44\varphi \quad (2.16)$$

É importante ressaltar que os valores da latitude ( $\varphi$ ), em radianos, são representados em módulo.

#### 2.4.2.1.2 Modelo de Saastamoinen

Saastamoinen (1973) desenvolveu um modelo baseado na suposição do decréscimo linear da temperatura até a Tropopausa, e acima desta camada a temperatura assume um valor constante. Dessa forma, admite-se uma atmosfera em equilíbrio hidrostático e que a quantidade total de vapor d'água concentra-se na troposfera, como um gás ideal.

O modelo de Saastamoinen baseado nas leis dos gases ideais é descrito pelas equações (SAASTAMOINEN, 1973):

$$D_{ZH} = 0,002277DP_0 \quad (2.17)$$

$$D_{ZH} = 0,002277D \left( \frac{1255}{T_0} + 0,05 \right) e_0 \quad (2.18)$$

onde:

- $P_0$  e  $e_0$  representam a pressão atmosférica na superfície em *hPa* e temperatura  $T$  em *Kelvin*;
- No valor constante (0,002277), presente nas duas fórmulas, está implícito os valores da constante  $k1$ , da constante específica dos gases hidrostáticos ( $R_h$ ) e da constante gravitacional efetiva ( $gm$ ). Essa última depende da latitude e altitude do local. Suas variações são corrigidas pela aplicação do fator de correção  $D$ , dado por:

$$D = (1 + 0,0026\cos 2\varphi + 0,00028h_0). \quad (2.19)$$

A altitude geométrica  $h_0$  é dada em quilômetros. Esse modelo considera a densidade do ar proporcional à pressão e inversamente proporcional à altitude e à gravidade (SAPUCCI, 2001).

#### 2.4.2.1.3 Modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) – CPTEC/INPE

Os modelos troposféricos disponíveis para descrever a troposfera foram desenvolvidos em sua maioria a partir da coleta de dados meteorológicos das regiões do hemisfério norte, e dependendo da acurácia desejada não são apropriados para a América do Sul. Em se tratando de posicionamento tanto em tempo real, quanto no modo pós-processado, esse é um fator importante que merece atenção.

Uma solução para esse problema seria a utilização dos modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT), como é o caso do modelo desenvolvido no CPTEC/INPE (FIGURA 17). Esse modelo permite obter, além dos valores de temperatura, umidade e pressão da superfície, previsões do atraso zenital troposférico com algumas horas de antecedência, em qualquer local da América do Sul (SAPUCCI *et al.*, 2003). Sapucci *et al* (2003) esclarece que o princípio de funcionamento é

bastante simples: conhecendo as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante  $t$ , desde que seja conhecido com precisão seu estado inicial no instante  $t_0$ .

A qualidade das previsões futuras está diretamente ligada à precisão com que a atmosfera é modelada e definida inicialmente em  $t_0$ . As leis da mecânica e termodinâmica são aplicadas para a água e o ar presentes na atmosfera. Assim, também é considerada a influência do sistema climático, a esfericidade da Terra, os raios solares, o papel do relevo, dos oceanos, vegetação, etc. Assim, tem-se que o atraso zenital é dado pela seguinte equação (SPILKER *et al.*, 1994):

$$D_z = D_{zh} + D_{zw} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left( k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh \quad (2.20)$$

Onde:

- $D_z$  atraso zenital total;
- $D_{zh}$  atraso zenital na componente hidrostática;
- $D_{zw}$  atraso zenital na componente úmida;
- $R_h$  constante específica para os gases hidrostáticos;
- $\rho$  densidade do ar;
- $k_1, k_2'$  e  $k_3$  são constantes da refratividade atmosférica;
- $Z_w^{-1}$  inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água.

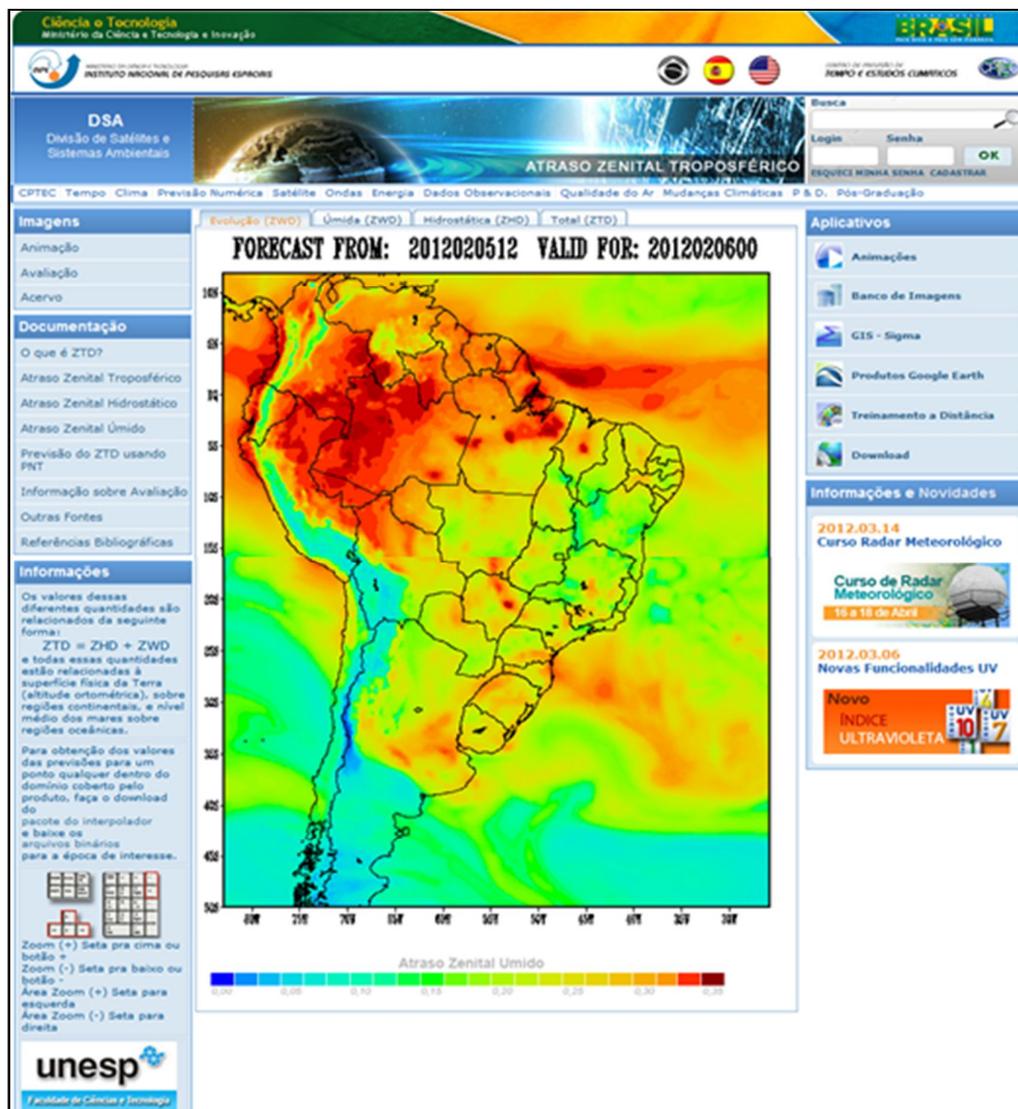


FIGURA 16 – MAPA DO ATRASO DA TROPOSFERA GERADO POR MODELO DE PNT  
 FONTE: CPTEC (2012)

O CPTEC disponibilizou a versão inicial da modelagem dinâmica em meados de 2004. Nesse modelo, os valores de ZWD e ZHD eram disponibilizados em uma malha de 500 por 500 km para a América Latina, onde cada elemento da malha possuía um arquivo com os dados cuja resolução era de 100 km na horizontal (denominado de GLB 100 km) e 18 níveis na vertical, com 66 horas de predição. Em seguida, no ano de 2008 a versão inicial sofreu atualizações na modelagem de PNT, e a resolução horizontal passou a ser de 20 km (denominado eta 20 km) com 19 níveis verticais, com 72 horas de predição do atraso zenital (SAPUCCI *et al.*, 2008). Recentemente, em fevereiro de 2012, o CPTEC disponibilizou a última versão denominado eta 15 km (grade de 15x15 km), com previsão de até sete dias dos

dados meteorológicos, com saídas do modelo a cada três horas, ou seja, oito previsões por dia. No entanto, essa versão encontra-se em fase de testes e consolidação. Logo, nessa pesquisa será adotada a grade de 20 km, para a determinação do efeito da troposfera na geração dos dados da VRS.

#### 2.4.2.1.4 Modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) – ECMWF

O ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) Viena tem-se destacado no progresso de previsão numérica de tempo a nível global, sendo um dos principais centros no avanço da previsão meteorológica e de assimilação de dados do mundo (FIGURA 18). Ele melhorou consideravelmente a precisão e confiabilidade da previsão do tempo, a partir de parcerias com a União Européia, a Organização Meteorológica Mundial (OMM), a Organização Européia na Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) e a Agência Espacial Européia (ESA).

O modelo troposférico global determinístico ECMWF utiliza técnicas de modelagem computacional de PNT, de modo que os cálculos requerem a entrada contínua de dados meteorológicos, coletados tanto por satélites, quanto por observações em Terra, por meio de estações automáticas, aviões, navios e radiossondas. O ECMWF é executado a cada 12 horas, de forma que o sistema de assimilação é acionado 4 vezes por dia fornecendo previsões a curto prazo de 6 horas, denominado FG (*First Guess*) (ECMWF, 2012). O FG é combinado com as observações disponíveis em um instante  $t$ , formando um estado da atmosfera conhecido por análise. Essa análise é adotada como condição inicial no processo de integração do modelo de PNT para os instantes  $t$  igual a 0, 6, 12 e 18 h, e simulam a evolução da atmosfera por um período de até 10 dias (KALNAY, 2003).

O sucesso na previsão está relacionado à capacidade de se modelar, com maior eficiência, a atmosfera terrestre e, principalmente, descrever com precisão o seu estado inicial. Para isso, o maior número possível de dados sobre as variáveis atmosféricas deve ser disponibilizado no momento em que o processo é inicializado (SEEBER, 2003). Dentre os principais parâmetros utilizados pelo modelo, destacam-

se as componentes zonal e meridional do vento, pressão, temperatura e umidade específica (ECMWF, 2012).

A resolução do modelo pode ser obtida por pontos de grade, procedentes de uma malha (*grid*). Na versão atual do modelo, os parâmetros de PNT encontram-se na resolução de 0,25 x 0,25 grau ( $\pm 25$  km) com 21 níveis na vertical (TEKE *et al.*, 2011).

The image shows the homepage of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). At the top, there is a navigation bar with links for Home, Your Room, Login, Contact, Feedback, Site Map, and a search box. Below this is a horizontal menu with categories: About Us, Products, Services, Research, Publications, and News&Events. A large map of Europe is visible on the left side of the header. The main content area is divided into several sections: 'Info' with links for Site Map, Phone Directory, Contact, and Feedback; 'News & Events' with links for Calendar, Training, Annual Seminar, Meetings, Workshops, Press Releases, and Employment; 'Forecasts' with a map of Africa and a link for 'Free access to deterministic medium-range (3-6 days) weather forecasts including MSLP and 850mb wind. Click here.'; 'Development of a new ECMWF website' with a photo of people in a meeting and text dated 03 May 2012; 'MACC-II General Assembly' with a photo of a meeting and text dated 07 March 2012; and 'Co-operation agreement with RIMES' with a logo and text dated 13 February 2012. On the right side, there is a 'Hot Links' section with various icons and logos for services like ISO-9001, WMO, TIGGE, macc, ERA, Reanalysis, Oceans, Data, EU Projects, and RMDCH.

FIGURA 17 – PÁGINA VIRTUAL DO CENTRO EUROPEU DE PREVISÃO DO TEMPO A MÉDIO PRAZO  
 FONTE: ECMWF (2012)

O atraso troposférico zenital baseado em PNT disponibilizado pelo ECMWF é determinado para altitude ( $h_0$ ) de zero metro, de modo que é necessário interpolar tais valores para a altura em que a estação  $h_s$  se encontra. Saastamoinen (1973) assume que há um decréscimo linear da temperatura com a altura, e que a pressão de vapor de água descrita exponencialmente diminui com a altura. Desta forma, a variação do atraso troposférico zenital é descrita pelas seguintes equações:

$$P = P_0 \left( 1 - \frac{\gamma(H - H_0)}{T_0} \right)^{\frac{g}{\gamma R_L}} \quad (2.21)$$

$$\Delta ZHD = \frac{0.0022768(P - P_0)}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi_0) - 0.28 \times 10^{-6} h_0} \quad (2.22)$$

$$\Delta ZWD = \frac{-2.789 e_0}{T_0^2} \left( \frac{5383}{T_0} - 0.7803 \right) \gamma (h - h_0) \quad (2.23)$$

Nas fórmulas 2.20 e 2.21,  $h_0$  é dado em metros representa a altitude da grade a zero metro, os parâmetros  $e_0$ ,  $P_0$  e  $T_0$  representam o vapor d'água em hpa, a pressão total na altitude zero em hpa e a temperatura inicial em Kelvin. Já  $h$  e  $P$  representam a altitude e pressão na posição da estação de referência. Os demais parâmetros são  $\gamma = 0,0065 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ,  $g = 9,7867 \text{ m}/\text{s}^2$  e a constante específica dos gases  $R_L = 287,058 \text{ m}^2/\text{s}^2 \text{ K}$ .

#### 2.4.2.1.5 Componentes de Atraso Troposférico

A FIGURA 18 ilustra a variação do atraso troposférico entre os modelos de Hopfield (Hop), Saastamoinen (Saast) e PNT/CPTEC com relação ao ângulo de elevação do satélite. Note que  $D_z$  varia aproximadamente de 2 a 23 m.

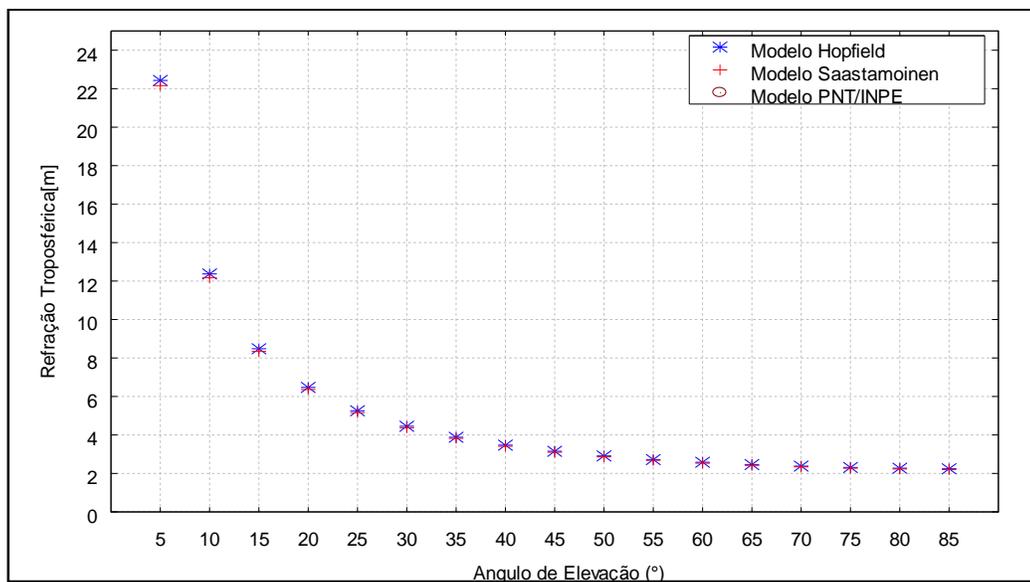


FIGURA 18 – VARIAÇÃO DA REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE ELEVÇÃO DO SATÉLITE

Nesta seção, as componentes úmida e hidrostática do modelo dinâmico de PNT/INPE foram avaliadas em comparação com as componentes dos modelos teóricos de Hopfield e Saastamoinen. A Figura 19 representa a variação da componente ZWD no período de 24h.

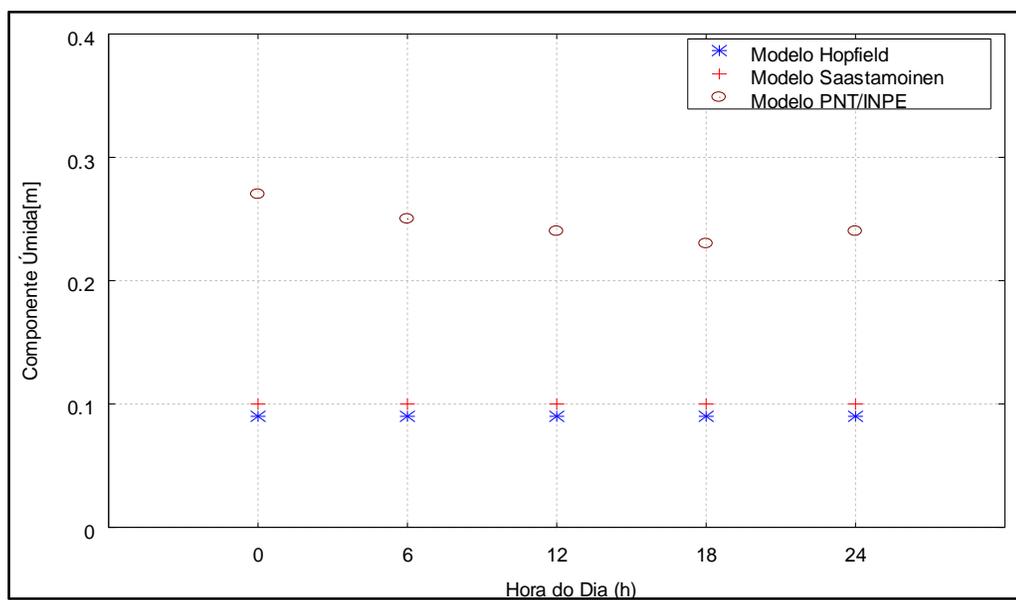


FIGURA 19 – VARIAÇÃO DIÁRIA DA COMPONENTE ZWD NOS MODELOS

Percebe-se na Figura 19 que para os modelos empíricos (Hopfield e Saastamoinen), as variações na componente úmida permanecem constantes durante o dia, em torno de 10 cm. Em contrapartida, com o modelo de PNT/INPE

percebe-se que a componente ZWD varia de 24 cm a 27 cm, isso ocorre devido às variações do vapor presente na troposfera. Em média a variação encontrada entre as componentes dos modelos foi de 59,3% (em média 14,6 cm).

A Figura 20 representa a variação do atraso troposférico para componente hidrostática.

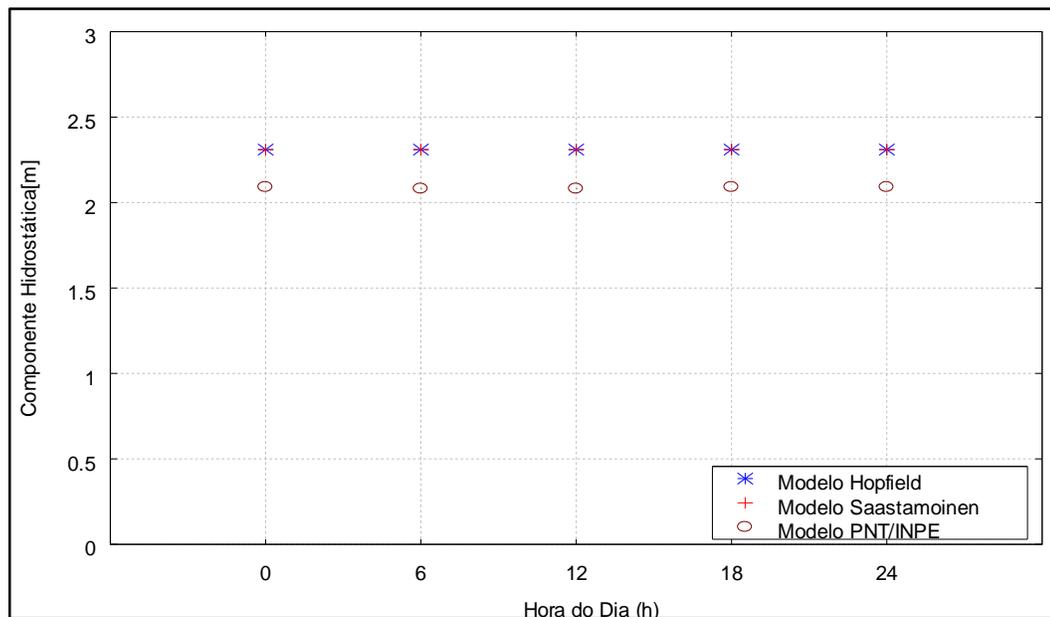


FIGURA 20 – VARIAÇÃO DIÁRIA DA COMPONENTE ZHD NOS MODELOS

Na Figura 20, as componentes ZHD dos modelos de Hopfield e Saastamoinen foram constantes e similares entre si. A componente ZHD de PNT/INPE, também permanece aproximadamente constante durante o dia, porém com variação média de 9,5% (em média 22 cm) em relação às componentes ZHD de Hopfield e Saastamoinen. Baseado em Seeber (2003), nota-se que a média para a componente ZWD de PNT/INPE calculada foi 29,7% melhor que a referência apresentada que é de 35 cm. Já a componente ZHD apresentou similaridade com a referência, cujo valor adquirido foi de 2,30 m.

A conclusão que se tira é que ao avaliar as componentes do ZTD, verifica-se que a componente úmida ZWD sofre maiores variações ao longo do dia em comparação com a componente hidrostática ZHD. Conforme mostrado na Figura 19, apesar de menor influência no ZTD, a componente ZWD apresenta alta variabilidade temporal durante o dia.

### 2.4.2.2 Funções de Mapeamento da Troposfera

A modelagem precisa dos atrasos provenientes da atmosfera neutra é um dos desafios das técnicas de posicionamento GNSS e VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) (BOHEM *et al.*, 2006b). A espessura da camada troposférica é diretamente proporcional à elevação dos satélites. No entanto, é necessário relacionar as componentes úmida e hidrostática com o ZTD (*Zenithal Tropospheric Delay*). A função de mapeamento faz com que o atraso troposférico zenital seja projetado no ângulo de elevação do satélite observado, ou vice-versa (BOHEM e SCHUN, 2004; SAPUCCI, 2001). De modo geral, a escolha da função de mapeamento está associada à menor dependência do ângulo de elevação do satélite, assim como a qualidade do modelo troposférico aplicado (FIGURA 21). O atraso troposférico total ( $D_{TROP}$ ) é obtido pela soma do efeito das componentes úmida e hidrostática multiplicadas por suas respectivas funções de mapeamento (SAPUCCI, 2001).

$$D_{TROP} = D_{ZH} \cdot mh(E) + D_{ZW} \cdot mw(E) \quad (2.22)$$

Onde:

- ✓  $D_{ZH}$  é o atraso zenital da componente hidrostática;
- ✓  $D_{ZW}$  é o atraso zenital da componente úmida;
- ✓  $(E)$  é o ângulo de elevação do satélite e
- ✓  $mh(E)$  e  $mw(E)$  são as funções de mapeamento que relacionam as componentes hidrostática e úmida, respectivamente.

Para os satélites localizados próximos ao zênite, pode-se adotar uma função de mapeamento simples como a cossecante do ângulo de elevação,  $1/\sin(E)$ , porém, para ângulos de elevação próximos ao horizonte essa função apresenta discrepâncias significativas (SAPPUCI, 2001; SHRESTHA, 2003).

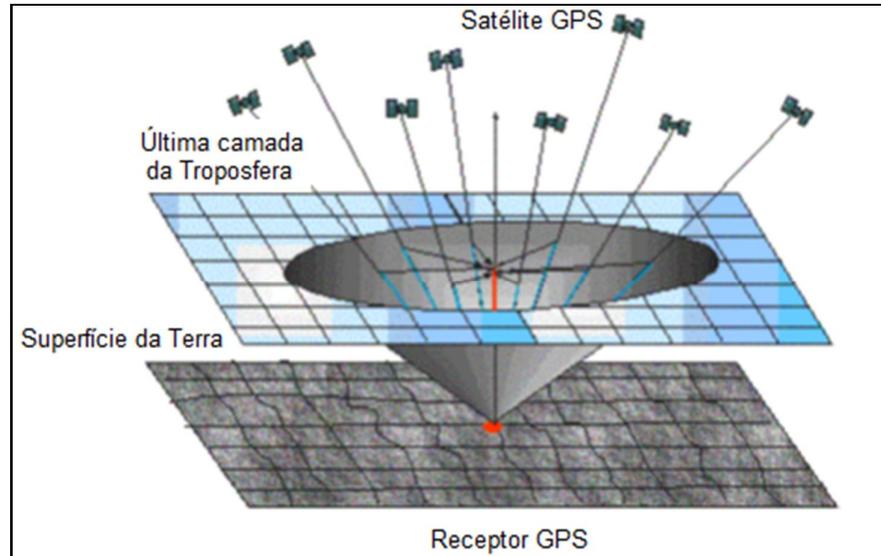


FIGURA 21 – ESQUEMA DAS FUNÇÕES DE MAPEAMENTO  
 FONTE: SAPUCCI (2001).

A seguir será realizado um histórico abordando as principais funções de mapeamento.

#### 2.4.2.2.1 Função de Mapeamento de Marini

Na derivação de expressões para correções troposféricas, Marini em 1972 comprovou que a dependência do ângulo de elevação de qualquer atmosfera poderia ser aproximada por meio da expansão em uma fração contínua de termos  $1/\sin(E)$  (SHRESTHA, 2003). Os coeficientes  $a, b$  e  $c$  são constantes ou funções lineares dependentes da temperatura, pressão e altitude da estação, determinados empiricamente.

$$m(E) = \frac{1}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + \frac{c}{\dots}}}} \quad (2.23)$$

#### 2.4.2.2.2 Função de Mapeamento de Chao

Chao em 1972 baseou-se na função de mapeamento de MARINI introduzindo implementações no modelo. O modelo continuou sendo uma fração contínua, porém a função seno foi substituída pela tangente, e os coeficientes  $a$  e  $b$  são determinados a partir de dados empíricos (SHRESTHA, 2003). As funções de mapeamento hidrostática e úmida são expressas por:

$$m(h) = \frac{1}{\sin(E) + \frac{0,00143}{\tan(E) + 0,0445}} \quad (2.24)$$

$$m(w) = \frac{1}{\sin(E) + \frac{0,00035}{\tan(E) + 0,017}} \quad (2.25)$$

#### 2.4.2.2.3 Função de Mapeamento de Herring

Herring em 1992 desenvolveu funções de mapeamento para as componentes úmida e hidrostática a partir de dados de radiossondagem coletados por várias estações da América do Norte, especificamente entre as latitudes de 27°N a 65°N para ângulos de elevação de até 3° (SHRESTHA, 2003). Os coeficientes dessa função são baseados na temperatura da superfície, o cosseno da latitude da estação e a altura da mesma. A expressão pode ser expressa por:

$$m(E) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}}{\frac{1}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + c}}} } \quad (3.26)$$

#### 2.4.2.2.4 Função de Mapeamento de Niell

A Função de Mapeamento de Niell (NMF - *Niell Mapping Function*) introduzida por Niell (1996) consiste em um modelo matemático robusto, quando comparada com as funções de mapeamento citadas anteriormente. Baseia-se em observações de mudança temporal e localização geográfica, portanto diferentemente das funções anteriores, a função de Niell não considera a medida da temperatura da superfície na obtenção do atraso zenital troposférico. Isso ocorre devido a três motivos. Inicialmente, a temperatura diurna sofre variações menores do que é representado pelas funções de mapeamento. As mudanças do comportamento na temperatura da superfície são maiores que as mudanças atmosféricas nas camadas superiores. Por último, as funções de mapeamento calculadas para os dias quentes de inverno podem não variar significativamente em relação aos dias frios de verão. Como a função de Niell não depende da temperatura na superfície, esses problemas são eliminados do modelo matemático.

A NMF teve seu desenvolvimento baseado na função de Marini, com os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  (MARINI, 1972 apud NIELL, 1996). Na componente hidrostática os coeficientes são dados em função do dia do ano, latitude e altitude da estação. Já a componente úmida depende apenas da latitude da estação (NIELL, 1996; SHRESTHA, 2003). A função de mapeamento de Niell é dada por:

$$m_h(E) = \frac{1 + \frac{a_h}{b_h}}{1 + \frac{c_h}{1 + c_h}} + \left\{ \frac{1}{\text{sen}(E)} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{b_{ht}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}} \right\} Hx10^{-3} \quad (3.27)$$

$$m_w(E) = \frac{1 + \frac{a_w}{1 + \frac{b_w}{1 + c_w}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_w}{\text{sen}(E) + \frac{b_w}{\text{sen}(E) + c_w}}} \quad (3.28)$$

Onde:

- $m_h(E)$  é a função de mapeamento para a componente hidrostática;
- $m_w(E)$  é a função de mapeamento para a componente úmida;
- $E$  é o ângulo de elevação do satélite;
- $H$  é a altitude das estações em relação ao nível do mar;
- $a_{ht} = 2,53 \times 10^{-5}$ ,  $b_{ht} = 5,49 \times 10^{-3}$  e  $c_{ht} = 1,14 \times 10^{-3}$  são valores ajustados pelo MMQ;
- $a_h$ ,  $b_h$ ,  $c_h$ ,  $a_w$ ,  $b_w$ ,  $c_w$  são calculados utilizando os coeficientes das componentes hidrostática e úmida (QUADRO 5).

Coeficientes	Latitude (°)				
	15°	30°	45°	60°	75°
<b>Componente Hidrostática – Média</b>					
$a_M \times 10^{-3}$	1,2769934	1,2683230	1,2465397	1,2196049	1,2045996
$b_M \times 10^{-3}$	2,9153695	2,9152299	2,9288445	2,9022565	2,9024912
$c_M \times 10^{-3}$	62,610505	62,837393	63,721774	63,824265	64,258455
<b>Componente Hidrostática – Amplitude</b>					
$a_A \times 10^{-5}$	0,0	1,2709626	2,6523662	3,4000452	4,1202191
$b_A \times 10^{-5}$	0,0	2,1414979	3,0160779	7,2562722	11,723375
$c_A \times 10^{-5}$	0,0	9,0128400	4,3497037	84,795348	170,37206
<b>Componente Úmida</b>					
$ax \times 10^{-4}$	5,8021897	5,6794847	5,8118019	5,9727542	6,1641693
$bx \times 10^{-3}$	1,4275268	1,5138625	1,4572752	1,5007428	1,7599082
$cx \times 10^{-2}$	4,3472961	4,6729510	4,3908931	4,4626982	5,4736038

QUADRO 5 – COEFICIENTES DAS COMPONENTES HIDROSTÁTICA E ÚMIDA DA FUNÇÃO DE MAPEAMENTO DE NIELL  
 FONTE: NIELL (1996)

Para obter o valor do coeficiente  $a_h$  da componente hidrostática na latitude  $\varphi$  ( $\varphi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ) em uma época  $d$ , dada em dias do ano, deve-se aplicar a seguinte fórmula:

$$a_h(\varphi, d) = a_M(\varphi) + a_A(\varphi) \cos \left[ 2\pi \frac{d-28}{365,25} \right] \quad (2.29)$$

Os coeficientes  $a_M(\varphi)$  e  $a_A(\varphi)$  estão listados no QUADRO 5.

#### 2.4.2.2.5 Função de Mapeamento de Viena

Alguns autores, nos últimos anos, têm desempenhado esforços no desenvolvimento de funções de mapeamento baseadas em PNT. Niell e Petrov (2003) introduziram a IMF (*Isobaric Mapping Function*) cuja aplicação trouxe

melhorias na avaliação do efeito troposférico inclinado, reduzindo em cerca de 20% a dependência do ângulo de elevação do satélite (VEY *et al.*, 2006). Porém, a IMF apresenta algumas limitações de aplicação, entre elas pode-se citar a variação espacial da componente hidrostática em relação à úmida. Outra desvantagem é a aproximação grosseira para descrever as variações da componente hidrostática, o que acarreta no uso de um NWM (*Numerical Weather Model* – Modelo Numérico de Tempo) com maior resolução temporal e espacial (NIELL e PETROV, 2003).

A VMF (*Vienna Mapping Function*) desenvolvida no ECMWF para as componentes úmida e hidrostática, objetiva determinar os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Esses coeficientes possibilitam determinar o atraso troposférico para uma elevação inicial de 3,3 graus (BOEHM e SCHUM, 2004; KOUBA, 2007). Os coeficientes  $b$  e  $c$  são determinados empiricamente a partir da IMF com base em dados de radiossondas, enquanto o coeficiente  $a$  é determinado pela técnica *ray-tracing*<sup>3</sup>, em função da latitude e dia do ano usando o NWM. Os parâmetros de entrada do *ray-tracing* são o ângulo de elevação inicial ( $e_0$ ), valores para altura, temperatura e pressão do vapor d'água em diferentes níveis da atmosfera neutra.

A FIGURA 22 representa a técnica *ray-tracing*. Nota-se que o ângulo de elevação inicial ( $e$ ) é menor que o ângulo de elevação do satélite ( $E_0$ ).

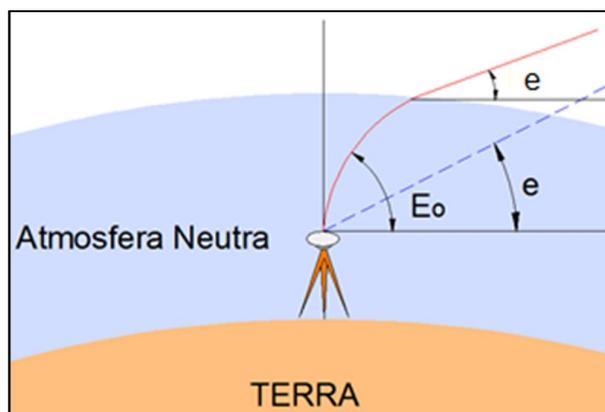


FIGURA 22 – TÉCNICA RAY-TRACING EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE  
FONTE: ADAPTADO DE BOEHM *ET AL.*, (2004)

A VMF só depende do ângulo de elevação do satélite e não do azimute, ou seja, a troposfera é considerada simétrica ao redor das estações. Mas, os coeficientes  $b$  e  $c$  desenvolvidos para a VMF no ECMWF apresentaram certas

<sup>3</sup> Uma forma de quantificar o atraso troposférico no sentido satélite-receptor é supor que o sinal eletromagnético seja um raio, determinado por meio de um modelo troposférico, essa técnica é conhecida como *ray-tracing* (NIEVINSKI, 2009).

deficiências para as regiões próximas ao Equador e latitudes elevadas. Devido a falhas no algoritmo, a VMF foi atualizada para a VMF1, com o desenvolvimento de novos coeficientes  $b$  e  $c$ , ajustados por mínimos quadrados. Os resíduos do ajuste foram normalmente menores que 0,5 mm (BOEHM *et al.*, 2006). Os valores da VMF1 ( $a_h$  e  $a_w$ ), são fornecidos em uma grade global de 2,5 x 2,0 graus, e em algumas regiões com resolução de 0,25 grau. Para cada parâmetro existem 4 arquivos por dia, o de 0, 6, 12 e 24 horas, armazenados em listas anuais. A VMF1 é atualmente a função de mapeamento que provê os resultados geodésicos com maior precisão, quando comparado com a NMF (BOEHM *et al.*, 2006b).

#### 2.4.2.2.6 Função de Mapeamento GMF

A função de mapeamento global GMF (*Global Mapping Function*) é baseada em dados climáticos do modelo numérico de tempo global do ECMWF. A GMF surgiu a partir da expansão dos parâmetros de harmônicos esféricos em escala global da VMF1 até grau e ordem 9. Semelhante a NMF, a determinação dos coeficientes depende da posição da estação e o dia de ano. A GMF foi determinada a partir de uma grade global de 15 x 15 graus, por meio de dados de perfis mensais para pressão, temperatura, e umidade em 40 estações do ECMWF, o que possibilitou a determinação dos coeficientes  $a_h$  e  $a_w$  (BOHEM *et al.*, 2006a).

#### 2.4.2.2.7 Funções de Mapeamento no Atraso Troposférico

Esta seção refere-se às análises realizadas com o atraso troposférico inclinado obtido como produto dos modelos de Hopfield, Saastamoinen e de PNT/INPE e as funções de mapeamento cossecante e Niell, conforme já descrito anteriormente. Na Figura 23, têm-se as diferenças encontradas no atraso troposférico para os diferentes ângulos de elevação do satélite usando a função de mapeamento cossecante do ângulo de elevação ( $\text{sen}^{-1}$ ).

Verifica-se na Figura 23, ao comparar os modelos teóricos entre si, notou-se que a distinção máxima foi de 1 cm, diferente do que ocorre para PNT/INPE. Por exemplo, observou-se que para o modelo de PNT/INPE as diferença encontrada para ângulo de elevação de 5 graus foi de 43 cm, em relação ao modelo empírico de Hopfield.

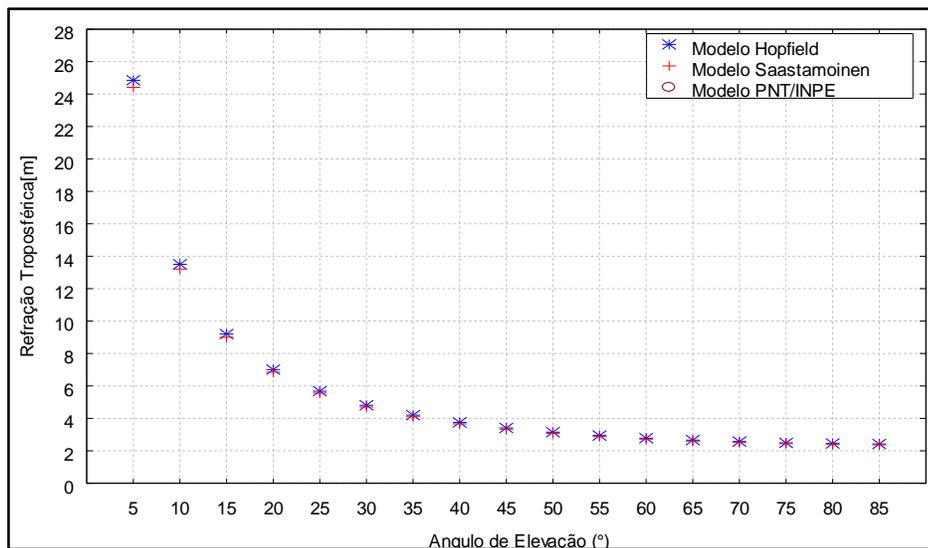


FIGURA 23 – COMPORTAMENTO DO ATRASO TROPOSFÉRICO INCLINADO UTILIZANDO A FUNÇÃO COSSECANTE DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO DO SATÉLITE ( $\text{SEN}^{-1}$ )

É possível visualizar as comparações realizadas empregando os modelos para troposfera e a função de mapeamento de Niell na Figura 24.

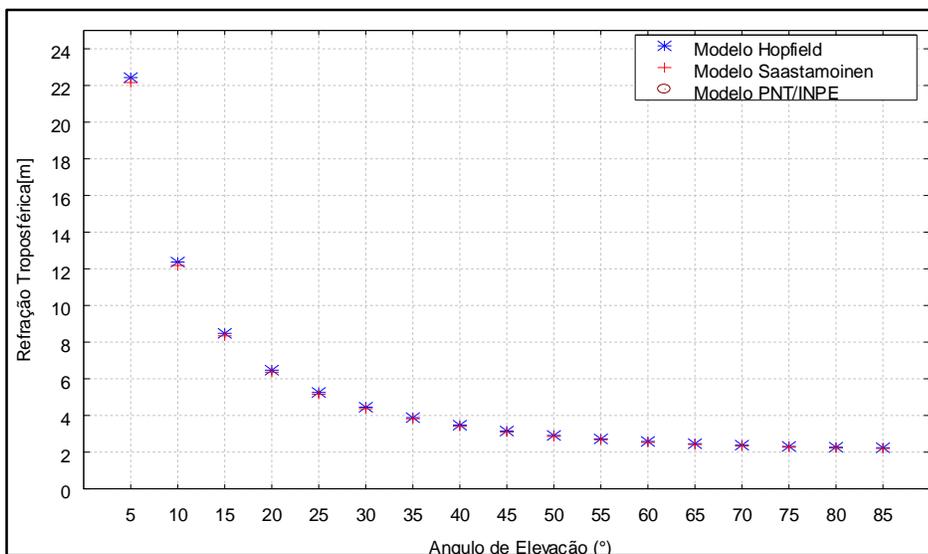


FIGURA 24– COMPORTAMENTO DO ATRASO TROPOSFÉRICO INCLINADO UTILIZANDO A FUNÇÃO DE NIELL

Percebe-se que ao analisar o efeito da troposfera na direção inclinada, conclui-se que a função de Niell foi mais precisa que a função cossecante do ângulo de

elevação. Por exemplo, para 5 graus de elevação o atraso encontrado foi de 25 m, já para 80 graus foi 4 m. Isso se deve provavelmente, devido a função de Niell ser mais acurada que função de mapeamento cossecante.

### 3 METODOLOGIA

A troposfera é considerada na Geodésia Espacial, como uma das maiores fontes de erro no posicionamento baseado em redes de estações de referência. Uma das maneiras de eliminar ou minimizar a influência de tal efeito é a adoção de modelos para troposfera. Nos dias atuais, tem-se investigado o uso de modelos de PNT (seção 2.4.2.1.3), cuja aplicação tem produzido bons resultados em comparação com modelos empíricos existentes. Testes iniciais com os modelos PNT/INPE e Hopfield foram realizados em Alves (2008), mas existia a necessidade de uma análise mais robusta envolvendo as quatro estações do ano e também experimentos para avaliar o desempenho do modelo PNT/ECMWF e a função de mapeamento VMF1. Os experimentos a serem realizados nesta dissertação consistem em comparar a eficácia de diversos modelos troposféricos, bem como investigar as diferentes configurações geométricas da rede ao gerar dados de VRS.

Na seção 3.1 é descrita a área de estudo no contexto da rede GNSS/SP. A seção 3.2 aborda assuntos referentes aos softwares de monitoramento da rede, bem como os receptores e antenas das estações GNSS. A seção 3.3 descreve as etapas da metodologia para gerar a VRS sem solucionar as ambiguidades da rede. A seção 3.4 diz respeito à obtenção dos dados meteorológicos, assim como o procedimento adotado para avaliação dos modelos troposféricos a partir da qualidade dos dados da VRS. Finalmente, a seção 4.5 descreve aspectos relativos à análise da qualidade da VRS com mudança de configuração geométrica entre as estações da rede, variando a distância entre a estação base e a posição da VRS.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A região de realização desta pesquisa é formada pelo conjunto de estações que compõe a rede GNSS do estado de São Paulo. Esta rede é composta por 15 estações de monitoramento contínuo com receptores de dupla frequência (L1 e L2), sendo que algumas delas encontram-se homologadas pelo IBGE. O centro de controle da rede GNSS está situado no município de Presidente Prudente - SP.

Todas as estações pertencentes à rede estão acopladas por estações meteorológicas, no monitoramento da umidade relativa, precipitação anual, pressão e temperatura da superfície dentre outras variações climáticas. A geometria e densidade das estações que compõe a rede permitem a realização de estudos atmosféricos na região, posicionamento baseado em redes, dentre outras aplicações. As distâncias entre estas estações de referência são da ordem de 120 a 285 km (FIGURA 25).

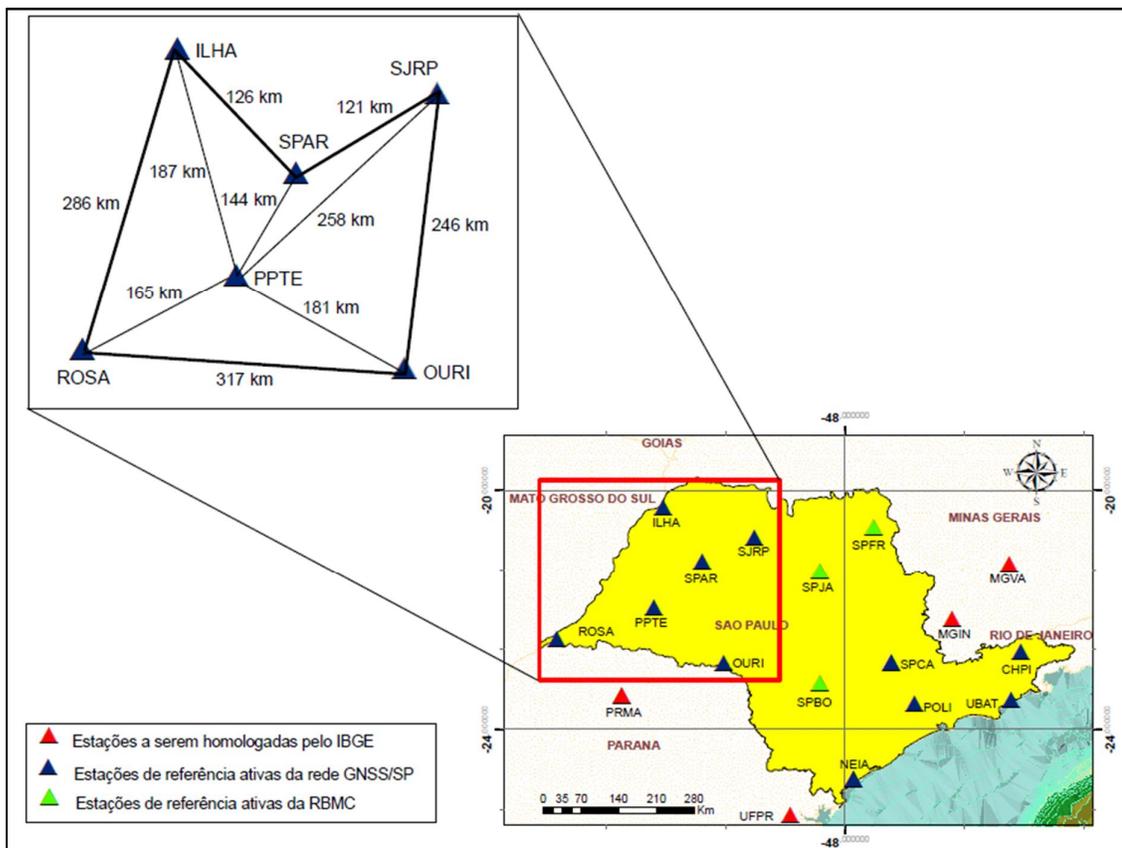


FIGURA 25 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ESTAÇÕES DA REDE GNSS/SP

### 3.2 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES DE MONITORAMENTO DA REDE

A rede GNSS/SP é constituída por receptores modernos que permitem a comunicação e envio de dados via internet ao computador central localizado em Presidente Prudente, assim, os dados são disponibilizados em tempo real via protocolo NTRIP (<http://www.fct.unesp.br>). Para acessá-los em tempo real, no intervalo de coleta desejado, basta utilizar o software NTRIP gratuito disponível em:

<http://igs.bkg.bund.de/>. No centro de controle os dados brutos no formato (dat) são gerenciados e armazenados por softwares (Leica - Spider e Trimble - GPSNet) no formato Rinx e Hatanaka. Os dados também são enviados para o IBGE em arquivos de 24 horas com intervalo de gravação de 15 segundos.

A FIGURA 26 ilustra a estação PPTe, localizada próximo ao centro de controle da rede GNSS/SP em Presidente Prudente.



FIGURA 26 – ESTAÇÃO PPTe PRÓXIMO AO CENTRO DE CONTROLE DA REDE GNSS/SP

### 3.2.1 Antenas e Receptores

Nessa seção são descritos os equipamentos (antenas e receptores) que são utilizados para a coleta dos dados de parte da rede GNSS/SP pertencentes à RBMC (QUADRO 6) (acesso em: 24/12/12):

ESTAÇÃO	RECEPTOR	ANTENA
ARAÇATUBA (SPAR)	TRIMBLE NETR8	TRIMBLE GNSS CHOKE RING
ILHA SOLTEIRA (ILHA)	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAX1202GG
OURINHOS (OURI)	NETR5	ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2
PRESIDENTE PRUDENTE (PPTe)	TRIMBLE NETR8	TRIMBLE GNSS CHOKE RING
ROSANA (ROSA)	NETR5	ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2
SÃO JOSÉ DO RIO PRETO (SJRP)	TRIMBLE NETRS	ZEPHYR GEODETIC

QUADRO 6 – TIPOS DE ANTENAS E RECEPTORES DA REDE GNSS/SP  
FONTE: IBGE (2012)

Os receptores em sua maioria são equipados com antenas que tem por objetivo amenizar o efeito multicaminho dos sinais que chegam de forma indireta à antena (FIGURA 27).



FIGURA 27 – ANTENA TRIMBLE GNSS CHOKE RING  
FONTE: NGS, 2012

### 3.3 METODOLOGIA PARA GERAR OS DADOS DA VRS

Nessa pesquisa empregou-se a metodologia desenvolvida por ALVES (2008), que consiste em gerar a VRS sem solucionar as ambiguidades da rede. A etapa de geração da VRS sem solucionar as ambiguidades é uma metodologia diferenciada que apresentou resultados satisfatórios, conforme publicado em Alves e Monico (2011). É importante destacar que nesta pesquisa, os testes foram realizados no pós-processamento, deste modo uma simulação em tempo real foi efetivada.

Os dados de entrada para o cálculo da VRS são as coordenadas e os dados RINEX das estações de referência, as efemérides precisas, as coordenadas da VRS e informações referentes à data e horário nos quais os dados da VRS devem ser gerados. Os dados das estações de referência da rede são obtidos automaticamente do banco de dados da rede GNSS/SP. As efemérides precisas são obtidas automaticamente no site do IGS.

Inicialmente é necessário estabelecer a estação base da rede, para isso são determinadas as distâncias entre a VRS e todas as estações que compõe a rede. A estação de referência mais próxima à VRS é escolhida como estação base. Posteriormente, com os dados da estação base são gerados os dados da VRS, por

meio do deslocamento geométrico (*DG*). Além disso, são geradas correções atmosféricas para a posição da estação base e para a posição da VRS, assim são calculadas a diferença do efeito troposférico e a diferença do efeito ionosférico entre as posições (FIGURA 28). As correções troposféricas foram determinadas a partir de modelos empíricos e de PNT, mas para a ionosfera não foram feitas correções.

No final do processo, após aplicar todas as correções da estação base, um arquivo RINEX é gerado, para que o usuário efetue posicionamento relativo no modo pós-processado, utilizando a VRS como estação de referência no apoio a levantamentos geodésicos.

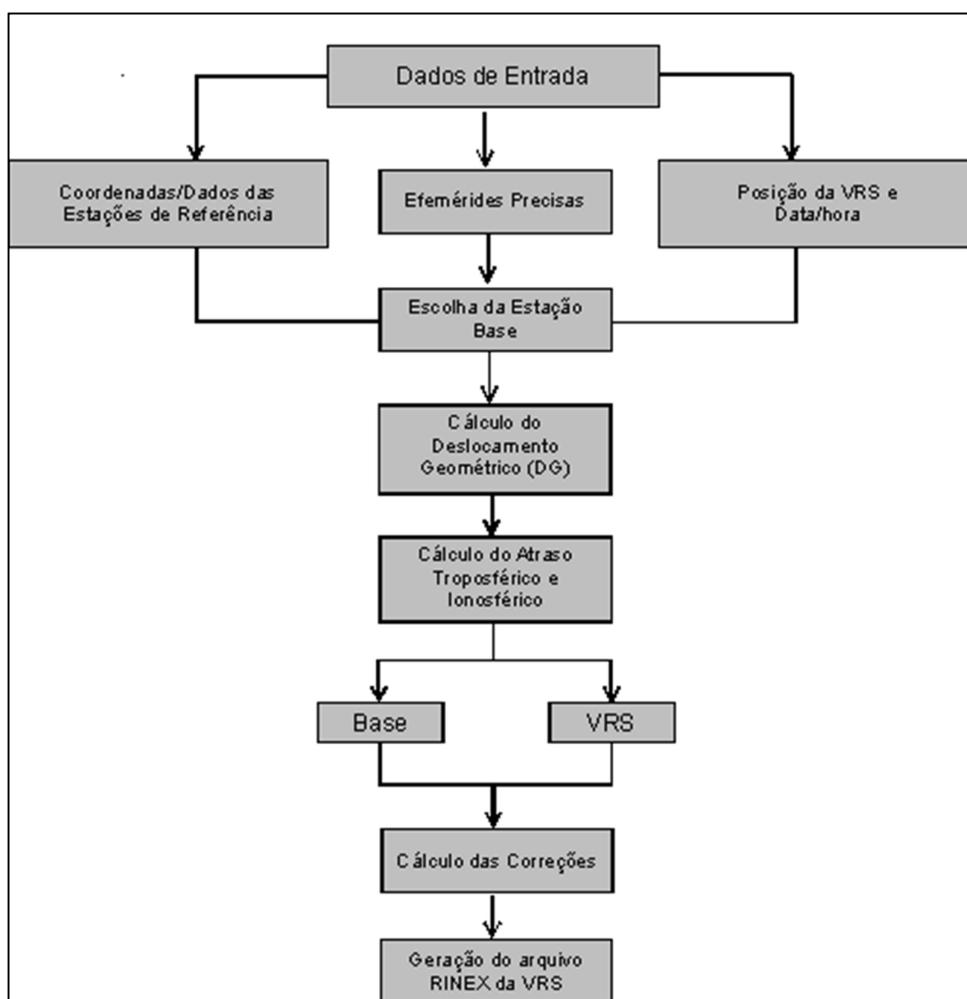


FIGURA 28 – ETAPAS PARA GERAÇÃO DA VRS SEM SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES NO RTK EM REDE  
 FONTE: ALVES (2008)

### 3.4 GERAÇÃO DA VRS COM DIFERENTES MODELOS TROPOSFÉRICOS

Após verificar a disponibilidade dos arquivos RINEX das estações da rede GNSS/SP no período de dezembro de 2010 a Janeiro de 2012, a etapa seguinte refere-se à análise dos dados meteorológicos empregando dias distintos, visando atender as quatro estações do ano. Para as estações verão, outono, inverno e primavera foram selecionados cinco dias úmidos e cinco dias secos. Essas amostras representam períodos críticos (secos e úmidos), permitindo a avaliação dos modelos de Hopfield e PNT (CPTEC – regional e ECMWF - global). Além das funções de mapeamento de Niell e VMF1.

A seção 3.4.1 descreve a metodologia de aquisição das observações meteorológicas, empregando séries temporais a partir de dados de observação GPS.

#### 3.4.1 Observações Meteorológicas Utilizando Séries Temporais

Apesar do atraso na componente úmida (ZWD) ser menor em relação a componente hidrostática (ZHD), conforme descrito na seção 2.4.2, o vapor d'água sofre bruscas variações no tempo. Essa variação impossibilita uma predição precisa, mesmo adotando medidas de umidade disponíveis na superfície. Em se tratando de posicionamento geodésico, o ideal é que esta componente (ZWD) seja minimizada ou até mesmo eliminada das observações. No entanto, do ponto de vista meteorológico a componente ZWD, pode ser convertida em IWV (*Integrated Water Vapour*), tornando o GPS uma ferramenta de suma importância no ramo da meteorologia. O parâmetro IWV é de fundamental importância na assimilação de dados de PNT, podendo ser utilizado como mais uma fonte de informações sobre o vapor d'água atmosférico (SAPUCCI *et al.*, 2008).

As observações meteorológicas neste contexto, em especial a umidade, podem ser obtidas a partir séries temporais de ZTD pelo software GIPSY-OASIS II (GOA II)

para as estações PPTe (posição da VRS) e SPAR<sup>4</sup> (estação base da rede). Essas séries temporais compreendem um conjunto de observações meteorológicas. É importante salientar que as observações meteorológicas medidas na superfície por meio de estações manuais e automáticas estão sujeitas a diversos tipos de erros, principalmente os de natureza grosseira nos instantes de registros de coleta manual ou até mesmo por falhas de coleta das estações automáticas. Nessa pesquisa foram adotados os dados advindos de séries temporais (seção 3.4.1.1), no processo de escolha dos dias amostrais representativos para as quatro estações do ano.

#### 3.4.1.1 Determinação das Amostras

Os dados contendo o atraso troposférico estimado no software GIPSY-OASIS II (GOA II) para as estações PPTe e SPAR foi disponibilizado pelo LGE. Este software permite a obtenção do atraso na componente úmida, mantendo a componente hidrostática constante. Primeiramente o ZTD para as estações PPTe e SPAR foi plotado em uma série temporal correspondente a um ano, de modo que o parâmetro para escolha dos dias amostrais consistiu na intersecção dos pontos amostrais entre as estações. Ou seja, foram considerados dias úmidos quando o atraso troposférico entre as duas estações era maior e dias secos quando o atraso era menor. Na Figura 29, é possível observar o comportamento do atraso troposférico para o período de um ano para as estações SPAR e PPTe.

---

<sup>4</sup> A estação PPTe foi adotada como posição da VRS por localizar-se no centro da rede. Dentre as estações da rede a estação SPAR encontra-se mais próxima da posição da VRS (PPTe).

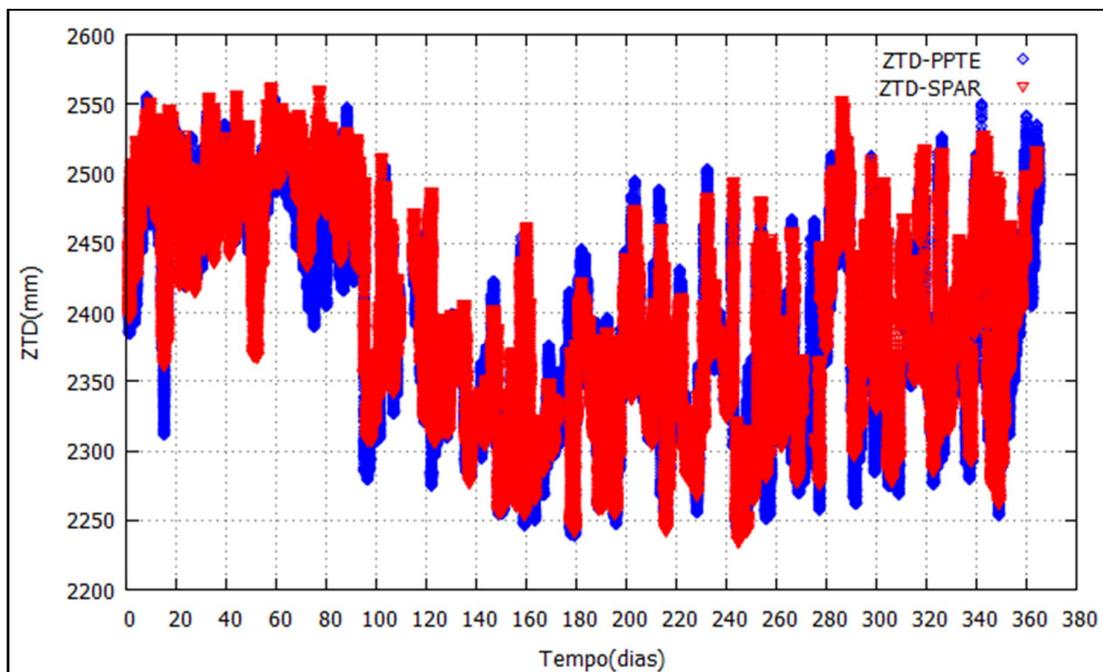


FIGURA 29 – SÉRIE TEMPORAL DAS ESTAÇÕES PPTe E SPAR

No QUADRO 7 é possível observar os dias selecionados com base no gráfico da Figura 29.

Dias	Verão	Outono	Inverno	Primavera
8 (08/01)	U			
33 (02/02)	U			
45 (14/02)	U			
58 (27/02)	U			
77 (18/03)	U			
105 (15/04)		U		
106 (16/04)		U		
116 (26/04)		U		
117 (27/04)		U		
146 (26/05)		U		
199 (18/07)			U	
200 (19/07)			U	
202 (21/07)			U	
204 (23/07)			U	
222 (10/08)			U	
252 (09/09)				U
254 (11/09)				U
258 (15/09)				U
259 (16/09)				U
315 (11/11)				U
14 (14/01)	S			
15 (15/01)	S			
43 (12/02)	S			
71 (12/03)	S			
73 (14/03)	S			
122 (02/05)		S		
123 (03/05)		S		
138 (18/05)		S		
152 (01/06)		S		
157 (06/06)		S		
195 (06/06)			S	
196 (15/07)			S	
244 (01/09)			S	
245 (02/09)			S	
248 (05/09)			S	
256 (13/09)				S
306 (02/11)				S
307 (03/11)				S
308 (04/11)				S
314 (10/11)				S

QUADRO 7 – QUADRO CONTENDO OS DIAS AMOSTRAIS SECOS (S) E ÚMIDOS (U).

Após a escolha dos dias, os arquivos RINEX dos dias amostrais das estações da rede OURI, ILHA, SJRP, ROSA, SPAR e PPTE foram selecionados e extraídos do banco de dados do IBGE para um diretório específico. Em seguida, calculou-se a posição aproximada da VRS da época 2000,4 para a época de levantamento 2011,5 referencial SIRGAS 2000 utilizando o software VMS2009 para cálculo de velocidades (SIRGAS, 2012) (QUADRO 8).

ESTAÇÃO PPTE	X	Y	Z
ÉPOCA 2000,4	3.687.624,367 m	-4.620.818,683 m	-2.386.880,382 m
ÉPOCA 2011,5	3.687.624,376 m	-4.620.818,740 m	-2.386.880,259 m

QUADRO 8 – COORDENADAS APROXIMADAS DA POSIÇÃO DA VRS (PPTE)

Posteriormente, houve a necessidade de edição dos arquivos RINEX utilizando o software TEQC (*Translate, Edit, Quality Check*), desenvolvido pela UNAVCO (*University NAVSTAR Consortium*) (disponível em: <http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>). O software científico desenvolvido por Alves (2008) permite apenas o processamento dos dados de código e fase (RINEX) do sistema GPS (representado pela letra G). Portanto, os dados de satélites provenientes do sistema russo GLONASS (R) e do sistema SBAS (S) foram eliminados.

O TEQC é um aplicativo gratuito que possui três funções básicas (LEANDRO, 2009), são elas:

- ✓ Transferência: conversão de dados do formato binário para o formato RINEX;
- ✓ Edição: edita dados do arquivo RINEX, como separar dados, mudar intervalo, remover satélites dentre outros;
- ✓ Controle de qualidade: avaliar a qualidade dos dados do arquivo RINEX através de indicativos calculados pelo programa, como: perdas de ciclos, SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), multicaminho (MP1 e MP2), dados relacionados com a ionosfera, dentre outros.

### 3.4.2 Implementação da Função de Mapeamento VMF1 e o Modelo PNT/ECMWF

Nessa seção é importante destacar que no software desenvolvido por pesquisadores da FCT/UNESP encontrava-se implementado o modelo dinâmico de PNT/INPE e o modelo empírico de Hopfield. Testes iniciais foram realizados com os modelos para troposfera, que podem ser vistos mais detalhadamente em Alves (2008) e Alves *et al.*, (2009). Assim, foi introduzido no software uma rotina com o modelo de PNT/ECMWF e a VMF1 (Apêndice A). A implementação da VMF1 e o modelo PNT/ECMWF foi realizada em ambiente C++ e introduzida no sistema

desenvolvido por Alves (2008). Como identificado na Figura 25 após a escolha dos dias amostrais, a etapa seguinte consistiu na aquisição dos arquivos diários contendo os coeficientes  $a_h$  e  $a_w$  e os atrasos ZHD e ZWD dispostos em 4 arquivos diários de 0h, 6h, 12h e 18h (disponível em: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/>). A Figura 30 mostra o formato do arquivo utilizado na interpolação dos coeficientes  $a_h$  e  $a_w$  e os atrasos ZHD e ZWD.

```

! Version:          1.0
! Source:           J. Boehm, TU Vienna (created: 2011-01-02)
! Data_types:       VMF1 (lat lon ah aw zhd zwd)
! Epoch:            2011 01 01 00 00 0.0
! Scale_factor:     1.e+00
! Range/resolution: -90 90 0 360 2 2.5
! Comment:          http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/
90.0  0.0  0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089
90.0  2.5  0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089
90.0  5.0  0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089
90.0  7.5  0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089
90.0  10.0 0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089
90.0  12.5 0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089
90.0  15.0 0.00114714  0.00065385  2.3334  0.0089

```

FIGURA 30 – FORMATO DO ARQUIVO OS COEFICIENTES CONTENDO OS COEFICIENTES E O ATRASO TROPOSFÉRICO

Posteriormente, a interpolação bilinear foi aplicada a fim de determinar os coeficientes e o atraso troposférico para a posição da VRS e da estação base da rede, possibilitando em seguida calcular a interpolação linear com relação ao tempo para os coeficientes  $a_h$  e  $a_w$ , e os atrasos ZHD e ZWD, conforme o tempo de rastreamento do arquivo RINEX do usuário.

A Figura 31 ilustra as etapas de implementação do modelo PNT/ECMWF e a função de mapeamento VMF1.

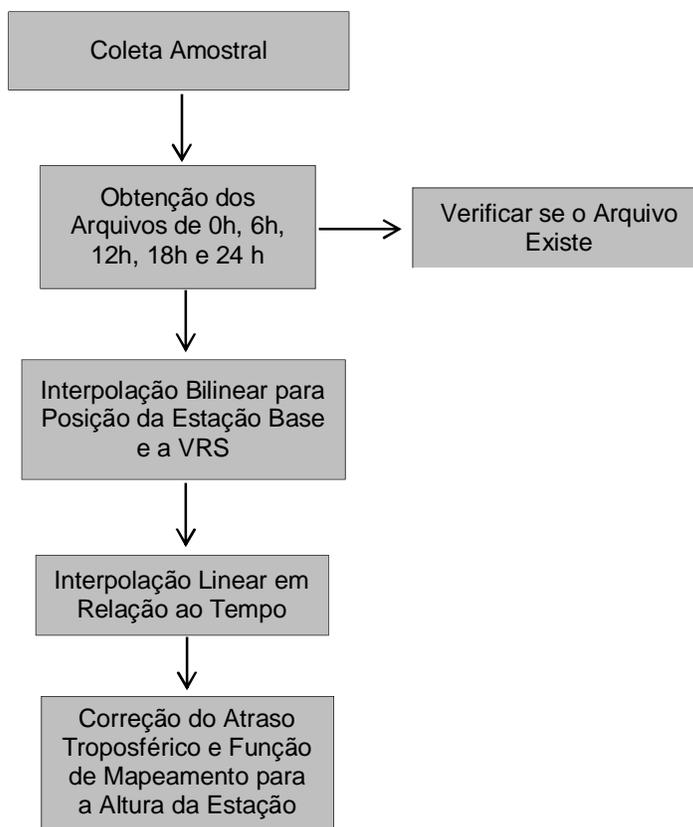


FIGURA 31 – ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DA VMF1 E PNT/ECMWF EM AMBIENTE C++

Para calcular o atraso troposférico inclinado, deve-se corrigir o ZHD e ZWD estimado para altitude zero pelo ECMWF, bem como a função de mapeamento VMF1 para a altitude da estação GPS. Deste modo, torna-se possível determinar o atraso troposférico inclinado, para cada satélite rastreado. Em seguida, introduziu-se essa classe na etapa “Cálculo do atraso troposférico e ionosférico” da Figura 28. Maiores detalhes sobre o experimento podem ser vistos na seção 4.1.

### 3.4.3 Análise de Qualidade com Aplicação do EMQ

Na análise de qualidade dos dados da VRS a melhor forma de se fazer a avaliação da acurácia é em termos de análise na tendência e precisão (incerteza). MONICO *et al.*, (2009) apresentam uma medida de acurácia, pelo cálculo do EMQ (Erro Médio Quadrático) dada pela equação 3.30.

$$EMQ^2 = \sigma_p^2 + b^2 \quad (3.30)$$

Onde:

$\sigma_p^2$  representa a dispersão das medidas (variância ou incerteza) e  $b^2$  representa a tendência ou vício do estimador. Detalhes sobre a aplicação prática do EMQ podem ser visualizados nos experimentos da seção 4.2.

### 3.5 GERAÇÃO DA VRS COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DAS ESTAÇÕES

Nesta seção, é apresentada a metodologia empregada com o objetivo de avaliar a variação da qualidade dos dados da VRS devido à mudança da configuração geométrica das estações da rede. Os dados da VRS foram avaliados adotando distâncias curtas e longas entre a posição da estação base da rede e a posição da VRS, além modificar a quantidade de estações de referência.

Os dados da VRS foram gerados na posição da estação PPTTE, tendo como base as estações disponíveis em suas proximidades. Posteriormente, demais experimentos foram realizados adotando uma configuração geométrica mais espaçada entre as estações. Neste teste, a posição da VRS foi fixada, aumentando progressivamente a distância da estação base da rede (FIGURA 32).

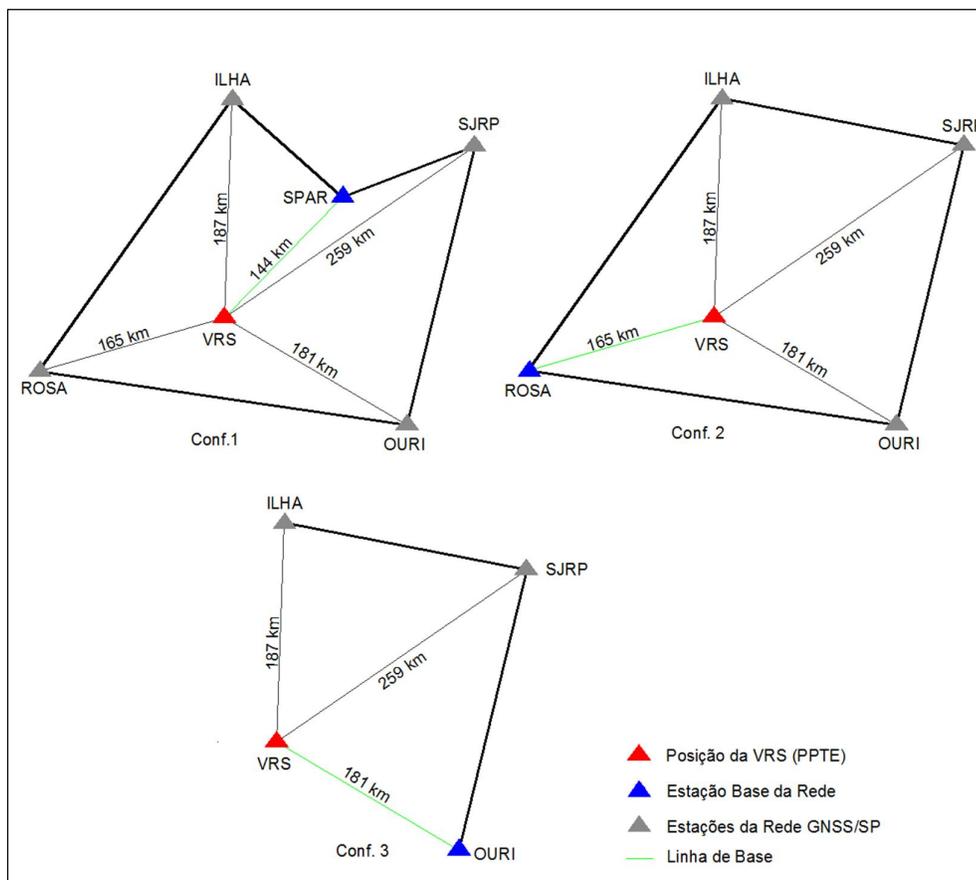


FIGURA 32 – VRS GERADA A PARTIR DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DA REDE GNSS/SP

A geração da VRS adotando uma configuração geométrica densa entre as estações deve melhorar a qualidade dos dados da VRS, pois nesse caso, os erros espacialmente correlacionados atuantes sobre a área de cobertura da rede podem ser modelados ou eliminados para a posição da VRS com maior acuracidade. A adoção de uma configuração espaçada entre as estações deverá afetar diretamente a qualidade da VRS, pois os efeitos atmosféricos devem ter sua modelagem deteriorada em razão da distância entre as estações de referência.

Foram selecionadas como estação base da rede as seguintes estações pertencentes à rede GNSS/SP: SPAR (Araçatuba) quando empregada cinco estações de referência, ROSA (Rosana) para quatro estações de referência e OURI (Ourinhos) quando utilizado três estações. Essas estações de referência foram utilizadas baseadas no critério de aproximação da posição da VRS (PPTE). Sendo a distância PPTE-SPAR de 144,09 km (Conf. 1), PPTE-ROSA de 165,15 km (Conf.2) e PPTE-OURI de 180,69 km (Conf. 3).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na seção 4.1 foi realizado o primeiro experimento, com o intuito de avaliar a qualidade dos modelos em diferentes condições atmosféricas no posicionamento geodésico. Já no segundo experimento (seção 4.2), avaliou-se a qualidade da VRS a partir da mudança na configuração geométrica das estações de referência da rede GNSS/SP. No Quadro 9 são apresentadas as siglas empregadas para caracterizar os diferentes modos da VRSs.

Modos de Processamento	Significado das Siglas
HOP+NIELL	Modelo de Hopfield com a função de mapeamento de Niell
HOP+VMF1	Modelo de Hopfield com a função de mapeamento VMF1
PNT/INPE+NIELL	Modelo de PNT/INPE com a função de mapeamento de Niell
PNT/INPE +VMF1	Modelo de PNT/INPE com a função de mapeamento VMF1
PNT/ECMWF+NIELL	Modelo de PNT/ECMWF com a função de mapeamento de Niell
PNT/ECMWF+VMF1	Modelo de PNT/ECMWF com a função de mapeamento VMF1
LB_VRS-SPAR	VRS gerada utilizando a estação base SPAR
LB_VRS-ROSA	VRS gerada utilizando a estação base ROSA
LB_VRS-OURI	VRS gerada utilizando a estação base OURI

QUADRO 9 – SIGNIFICADO DAS SIGLAS UTILIZADAS EM DIFERENTES MODOS DA VRS

Para verificar a qualidade dos dados das VRSs, conforme descrito na seção 3.4, foi realizado o PP no modo estático e cinemático para os dados amostrais representando as 4 estações do ano. Para isso, foi utilizado um software CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System*) disponibilizado *online* pelo NRCan (*Natural Resources Canada*) (disponível em: [http://www.geod.nrcan.gc.ca/online\\_data\\_e.php](http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php)).

### 4.1 AVALIAÇÃO DOS MODELOS TROPOSFÉRICOS E FUNÇÕES DE MAPEAMENTO PARA DIAS ÚMIDOS E SECOS

Na seção 4.1.1 os experimentos foram realizados com o processamento das VRSs no método PP modo estático e cinemático para os dias úmidos e secos. Em

seguida, processou-se a VRS no método PPP seguindo as mesmas características adotadas no método de PP.

#### 4.1.1 Posicionamento por Ponto

No método de PP, apenas a observável C1 (código C/A) do arquivo RINEX foi processada com o software CSRS-PPP nos modos estático e cinemático. Os valores de EMQ são apresentados para as VRSs geradas a partir de diferentes modelos para troposfera, bem como os valores de EMQ para os dados reais da estação.

##### 4.1.1.1 Estação Verão

Para realizar as análises no período de verão em períodos úmidos e secos, o EMQ obtido com os modelos troposféricos foram comparados no método PP estático e cinemático. A Figura 33 apresenta os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com o processamento dos dados do arquivo real (PPTe) e das VRSs geradas em dias úmidos e secos. A Figura 34 apresenta o EMQ da componente altimétrica.

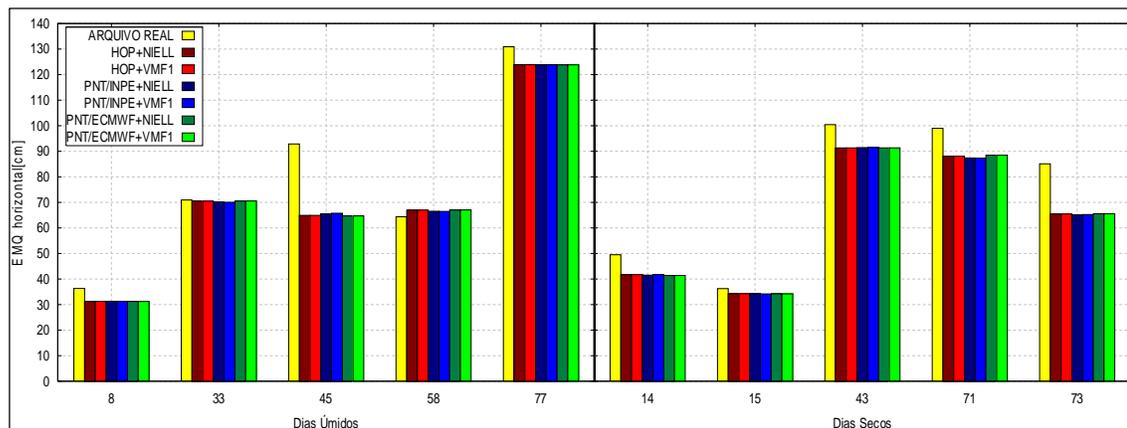


FIGURA 33 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO

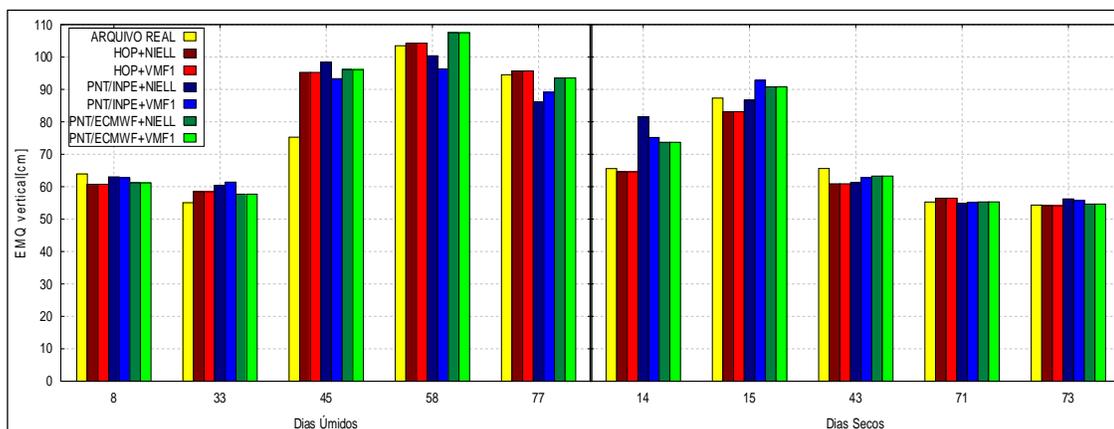


FIGURA 34 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO

Nos dias úmidos representados pela Figura 33, nota-se que a média do valor de EMQ foi similar na componente horizontal para ambos os modelos. Mas, os modelos de PNT/INPE+NIELL, PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foram ligeiramente melhores que os modos HOP+NIELL, HOP+VMF1 e PNT/INPE+VMF1, com melhoria de 0,04% (média de 0,03 cm de melhoria), respectivamente. Já em dias secos, percebe-se que na resultante planimétrica a melhoria alcançada chega a 0,3% com aplicação de PNT/INPE+NIELL em relação modelo de HOP+NIELL (melhoria de 0,21 cm).

Para a componente vertical na Figura 34, em dias úmidos nota-se que o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou melhor desempenho para a componente vertical no PP estático, visto que o valor médio do EMQ obtido com HOP+NIELL e HOP+VMF1 foi de 82,87 cm, mas com PNT/INPE+VMF1 foi de 80,56 cm. Isso representa uma melhoria na média geral de 2,8% de PNT/INPE com relação ao método empírico de Hopfield (média de 2,31 cm de melhoria). Em dias secos, na componente vertical os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 apresentaram melhores resultados, o EMQ obtido foi 63,83 cm sendo 5,5% melhor em relação aos modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 (média de 3,71 cm de melhoria), respectivamente.

A Tabela 1 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 1 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
8	73,52	71,58	68,30	68,30	70,37	70,09	68,69	68,69
33	89,79	99,10	91,56	91,56	92,58	93,16	91,13	91,13
45	119,53	109,40	115,27	115,26	118,17	114,15	115,86	115,84
58	121,85	131,20	123,89	123,89	120,42	117,04	126,67	126,67
77	161,47	157,48	156,54	156,55	150,83	152,57	155,16	155,16
$\bar{x}$	<b>113,23</b>	<b>113,75</b>	<b>111,11</b>	<b>111,11</b>	<b>110,48</b>	<b>109,40</b>	<b>111,50</b>	<b>111,50</b>

Analisando a Tabela 1 pode-se perceber razoável melhoria quando o modo PNT/INPE+VMF1 é aplicado, o EMQ que em média era 113,75 cm passou para 109,40 cm, com benefício de 3,8%. Com relação aos modelos HOP+NIELL e HOP+VMF1 a melhoria foi em média de 1,5% (em média melhoria de 1,7 cm).

A Tabela 2 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 2 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
14	82,16	78,46	76,87	76,87	91,48	86,00	84,52	84,52
15	94,55	92,08	89,89	89,90	93,18	98,85	97,03	97,03
43	119,96	110,51	109,76	109,76	110,03	110,94	111,12	111,12
71	113,37	116,86	104,57	104,57	103,21	103,24	104,33	104,34
73	100,96	91,41	84,95	84,95	86,08	85,78	85,36	85,36
$\bar{x}$	<b>102,20</b>	<b>97,86</b>	<b>93,21</b>	<b>93,21</b>	<b>96,79</b>	<b>96,96</b>	<b>96,47</b>	<b>96,47</b>

Analisando os dados da Tabela 2 pode-se perceber considerável melhoria quando os modelos HOP+NIELL e HOP+VMF1 são aplicados. O EMQ obtido foi de 93,21 cm, com relação aos modos PNT/INPE+NIELL, PNT/INPE+VMF1 e PNT/ECMWF as melhorias obtidas foram de 3,7%, 3,9% e 3,4% (em média melhoria de 3,6 cm, 3,75 cm e 3,3 cm).

A Figura 35 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PP modo cinemático. Já a Figura 36 representa o EMQ da componente altimétrica.

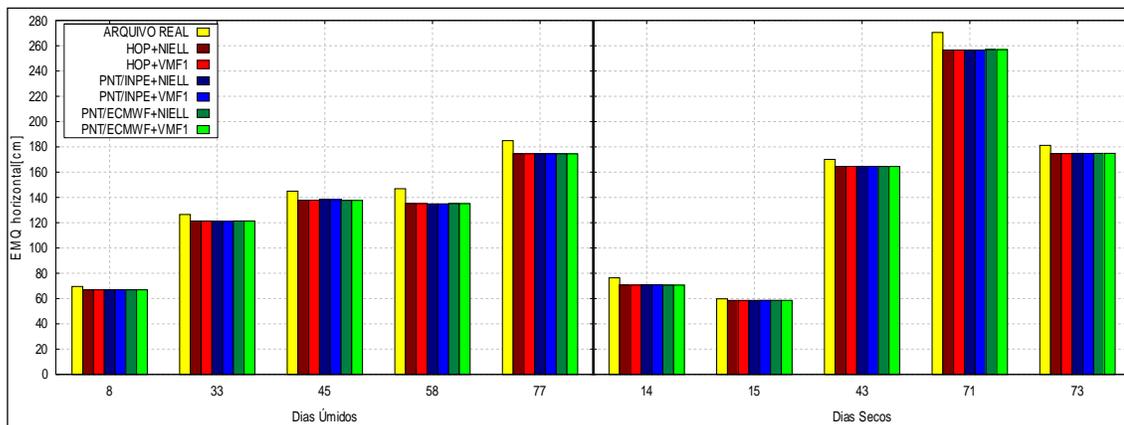


FIGURA 35 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO

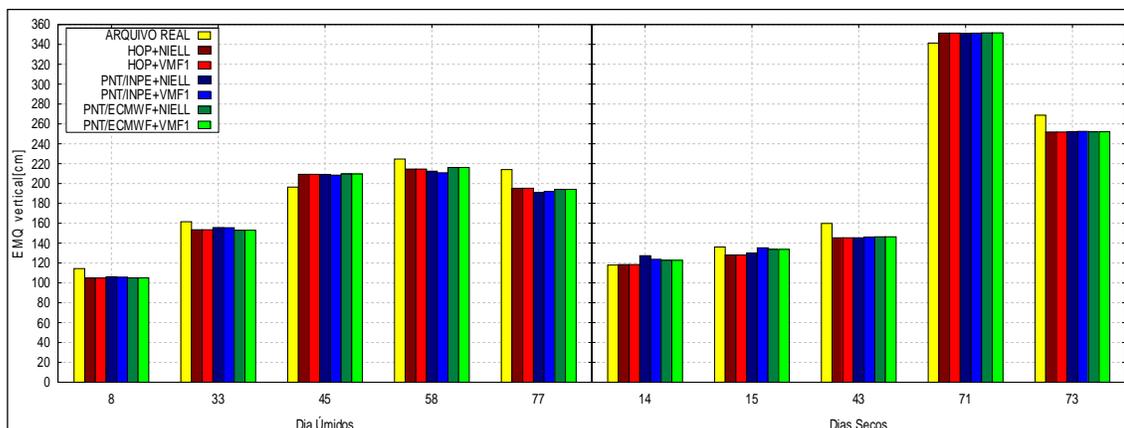


FIGURA 36 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO VERÃO

Observando a Figura 35, pode-se notar que da mesma forma que no método estático, em dias úmidos a VRS gerada nos modos PNT/INPE+NIELL e PNT/ECMWF+NIELL proporcionaram melhores resultados. Com o uso de PNT/INPE+NIELL, PNT/ECMWF+VMF1 e PNT/ECMWF+NIELL as médias do EMQ resultante foram de 127,10 cm, respectivamente. Por outro lado, com a aplicação do modelo de Hopfield a média foi de 127,12 cm na componente horizontal, o que caracteriza melhoria apenas de 0,02% na componente (média de 0,02 cm de rendimento).

Analisando a VRS para dias secos, verifica-se que de forma geral, os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 apresentaram melhor desempenho para a componente planimétrica, visto que o valor médio do EMQ obtido com os modos PNT/INPE+NIELL, PNT/INPE+VMF1, PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foi de 145,08 cm, mas com Hopfield foi de 144,98 cm. Isso representa uma leve

melhoria na média geral de 0,06% de HOP+NIELL e HOP+VMF1 com relação a PNT/INPE e PNT/ECMWF (média de 0,1 cm de melhoria).

Em relação à componente vertical na Figura 36, em dias úmidos a VRS gerada por PNT/INPE+VMF1 proporcionou EMQ médio de 174,51 cm. Já com os modos de Hopfield o EMQ médio foi de 175,47 cm, o que caracteriza melhoria de 0,5% (em média melhoria de 0,96 cm). Já em dias secos pode-se concluir que os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 proporcionaram melhores valores de EMQ. Na média o EMQ obtido foi de 199,01 cm, com relação ao modo PNT/INPE+NIELL o EMQ foi 201,19 cm. O que representa uma melhoria de 1,1% com emprego de Hopfield. A Tabela 3 representa a resultante 3D do EMQ para os dias úmidos.

TABELA 3 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
8	133,87	127,26	124,37	124,36	125,47	125,24	124,51	124,50
33	205,17	201,08	195,63	195,63	197,16	196,99	195,26	195,26
45	244,12	251,87	250,51	250,52	250,58	250,09	250,72	250,72
58	268,42	262,14	253,53	253,53	251,66	250,30	254,85	254,85
77	282,84	263,00	261,88	261,88	258,61	259,46	260,98	260,99
$\bar{x}$	<b>226,89</b>	<b>221,07</b>	<b>217,18</b>	<b>217,19</b>	<b>216,70</b>	<b>216,42</b>	<b>217,27</b>	<b>217,26</b>

Analisando os dados da Tabela 3, percebe-se que o modo PNT/INPE+VMF1 proporcionou melhores resultados. O EMQ que em média era de 217,19 cm no modo HOP+VMF1 passou para 216,42 cm com emprego de PNT/INPE+VMF1, o que implica em uma melhoria de 0,35% (em média melhoria de 0,8 cm) com emprego do modelo de PNT/INPE. Na Tabela 4 é apresentado o EMQ da resultante 3D para as VRSs geradas em dias secos.

TABELA 4 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
14	140,51	139,59	137,89	137,89	145,77	142,60	141,52	141,52
15	148,62	142,61	140,71	140,72	142,45	147,43	145,96	145,97
43	233,42	221,70	219,53	219,53	219,58	220,09	220,17	220,17
71	435,51	441,72	435,12	435,11	434,86	435,02	435,49	435,49
73	324,11	309,43	306,49	306,49	306,93	307,11	306,80	306,80
$\bar{x}$	<b>256,44</b>	<b>251,01</b>	<b>247,95</b>	<b>247,95</b>	<b>249,92</b>	<b>250,45</b>	<b>249,99</b>	<b>249,99</b>

Verifica-se na Tabela 4 que a VRS gerada nos modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 proporcionaram melhores valores de EMQ para o teste realizado. Na média nota-se que o EMQ para Hopfield foi 247,95 cm, por outro lado o modo PNT/INPE+NIELL obteve valores de EMQ em média de 249,92 cm. Portanto, com a aplicação de Hopfield a melhoria alcançada foi de 0,8% (em média melhoria de 1,97 cm) sobre PNT/INPE+NIELL.

#### 4.1.1.2 Estação Outono

A Figura 37 apresenta os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com processamento dos dados do arquivo real e das VRSs geradas por diferentes modelos para troposfera em dias úmidos e secos. Já na Figura 38 é apresentado o EMQ para a componente altimétrica.

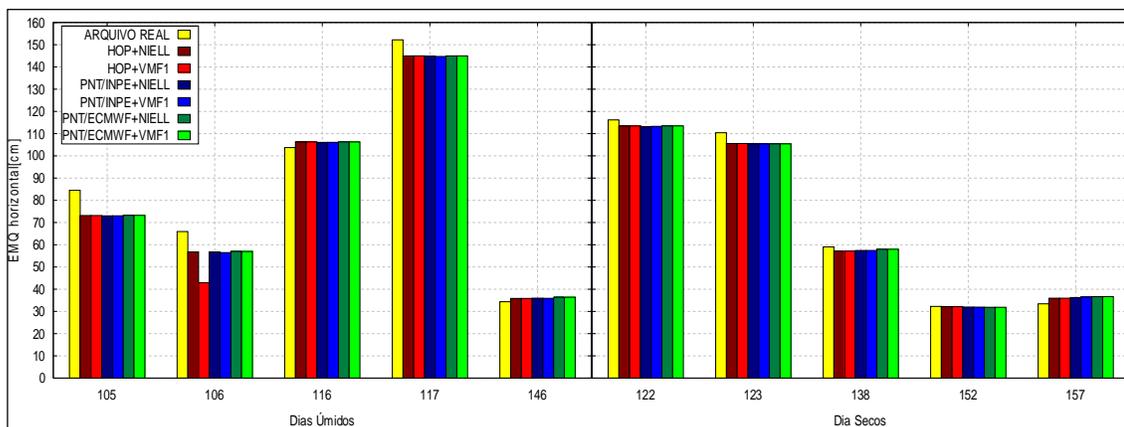


FIGURA 37 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO

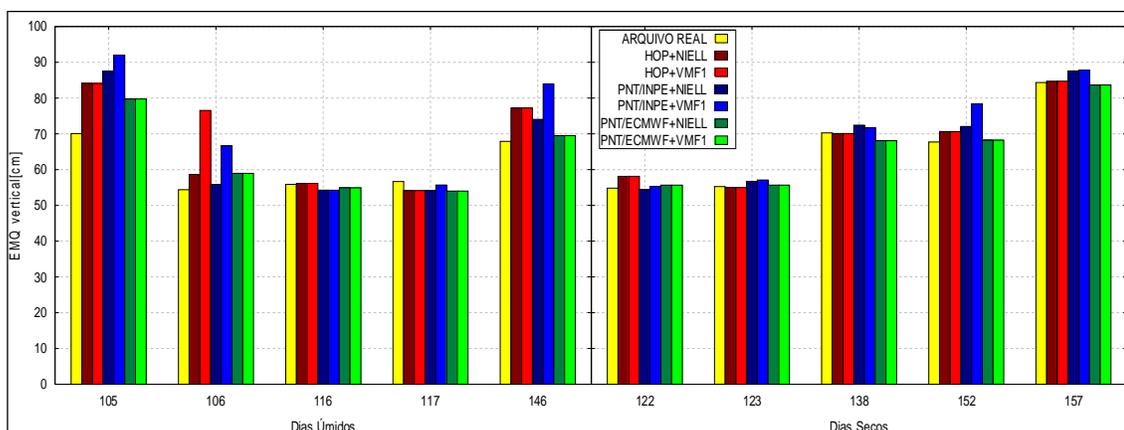


FIGURA 38 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO

Verificando a Figura 37, é possível notar que em dias úmidos, os melhores resultados para a VRS foram encontrados com o modelo HOP+VMF1. Em relação à resultante planimétrica, o EMQ do modo HOP+NIELL foi em média 80,64 cm. Já para a VRS gerada por PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1, o EMQ é de 83,56 cm, respectivamente (melhoria de 3,5% para Hopfield). Com base em testes realizados em dias secos, constatou-se que o modo PNT/INPE+NIELL proporcionou resultados ligeiramente melhores que HOP+NIELL e HOP+VMF1. O EMQ que era 68,85 cm com modos de Hopfield passou para 68,82 cm com aplicação de PNT/INPE+NIELL (em média melhoria de 0,04%).

Na Figura 38, em dias úmidos os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhor desempenho para a componente vertical no PP estático, o EMQ médio obtido foi de 63,42 cm. A melhoria encontrada foi de 4% e 8,9% quando comparada aos modos HOP+NIELL e HOP+VMF1, respectivamente (em média melhoria de 2,6 cm e 6,2 cm, consecutivamente). Para a

componente vertical em dias secos a VRS gerada nos modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 proporcionaram melhorias de 2,1% em relação aos modos de Hopfield.

A Tabela 5 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 5 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
105	109,77	112,93	111,44	111,44	113,91	117,44	108,27	108,26
106	85,48	86,60	81,60	87,77	79,62	87,33	81,98	81,97
116	117,83	124,04	120,17	120,17	119,14	119,14	119,62	119,62
117	162,42	157,57	154,76	154,76	154,61	155,07	154,70	154,71
146	76,10	90,35	85,13	85,12	82,31	91,30	78,43	78,42
$\bar{x}$	<b>110,32</b>	<b>114,30</b>	<b>110,62</b>	<b>111,85</b>	<b>109,92</b>	<b>114,06</b>	<b>108,60</b>	<b>108,60</b>

Analisando a Tabela 5, pode-se perceber melhoria quando os modelos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 são aplicados, o EMQ que em média era 111,85 cm no modo HOP+VMF1 passou para 108,60 cm, o que representa uma melhoria de 2,9% com emprego do modelo de PNT/ECMWF. Ademais, os resultados obtidos pela VRS são similares aos do arquivo real.

A Tabela 6 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 6 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO MÉTODO PP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
122	128,48	131,14	127,47	127,47	125,53	126,06	126,40	126,40
123	123,47	120,52	119,04	119,04	119,64	119,82	119,21	119,21
138	91,78	97,38	90,43	90,43	92,42	91,85	89,42	89,41
152	75,01	78,67	77,60	77,60	78,83	84,62	75,29	75,29
157	90,72	99,56	92,03	92,03	94,79	95,04	91,34	91,34
$\bar{x}$	<b>101,89</b>	<b>105,45</b>	<b>101,32</b>	<b>101,31</b>	<b>102,24</b>	<b>103,48</b>	<b>100,33</b>	<b>100,33</b>

Analisando a Tabela 6 pode-se perceber razoável melhoria quando os modelos PNT/ECMWF são aplicados, o EMQ que em média era 101,32 cm para Hopfield passou para 100,33 cm com uso dos modelos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1. Isso trouxe uma melhoria de 0,97% (em média 0,99 cm) com aplicação de PNT/ECMWF. Além disso, esses resultados também se assemelham por aqueles apresentados pelo arquivo real.

A Figura 39 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PP modo cinemático.

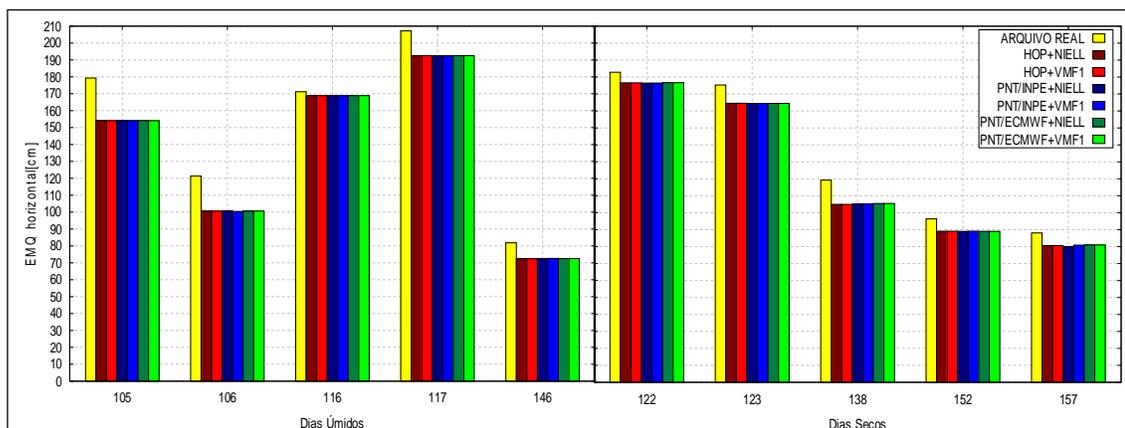


FIGURA 39 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO

A Figura 40 representa o EMQ da componente altimétrica para o PP no modo cinemático.

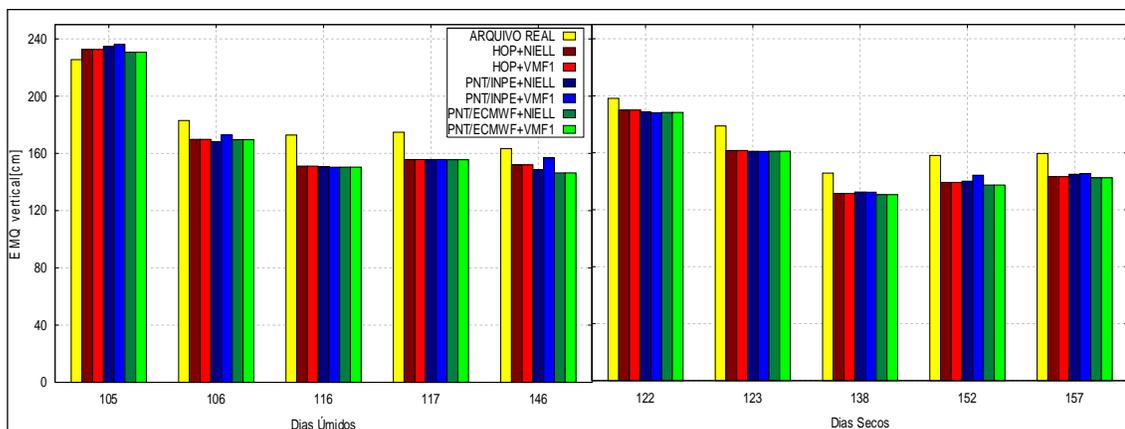


FIGURA 40 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO OUTONO

Observando os dias secos na Figura 39, é possível notar que os modelos na componente horizontal apresentaram valores de EMQ similares e melhores que aqueles obtidos pelo arquivo real. Porém, os modos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 apresentaram-se levemente melhores que os modos HOP+NIELL

e HOP+VMF1, uma melhoria de 0,02% e 0,04% (média de 0,03 cm e 0,06 cm), respectivamente.

Em dias secos, verifica-se que o modelo PNT/INPE+NIELL proporcionou melhores resultados que os modos empregando Hopfield. O EMQ em média foi de 123,03 cm, por outro lado os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 obtiveram EMQ médio de 123,16 cm. Isso representa um avanço de 0,1% (melhoria de 0,13 cm) com utilização de PNT/INPE+NIELL ao invés de Hopfield.

Analisando a Figura 40 notou-se que os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhores resultados, visto que o valor médio do EMQ obtido com os modos para Hopfield foi de 172,21 cm, mas com PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foi de 170,53 cm. Isso representa uma melhoria na média geral de 0,9% de PNT/ECMWF com relação ao método teórico de Hopfield (média de 1,68 cm de melhoria).

Para dias secos na componente vertical, é possível observar que melhores resultados foram adquiridos com os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 valores esses 0,7% (melhoria em média de 1,1 cm) melhores que os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1. A Tabela 7 representa a resultante altimétrica do EMQ para dias úmidos.

TABELA 7 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO MÉTODO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
105	288,12	278,09	278,98	278,97	280,72	281,87	277,40	277,40
106	219,56	197,27	197,34	197,33	195,98	199,86	197,22	197,22
116	243,28	228,02	226,61	226,60	226,14	226,03	226,14	226,14
117	271,08	251,76	247,62	247,62	247,57	247,55	247,56	247,56
146	182,66	171,16	168,28	168,28	165,25	172,70	163,37	163,37
$\bar{x}$	<b>240,94</b>	<b>225,26</b>	<b>223,77</b>	<b>223,76</b>	<b>223,13</b>	<b>225,60</b>	<b>222,34</b>	<b>222,34</b>

Analisando a Tabela 7, observa-se que o modelo PNT/ECMWF obteve melhor desempenho que o modelo empírico de Hopfield, o que representa benefício de 0,6% (em média 1,43 cm de melhoria). As funções de mapeamento VMF1 e Niell proporcionaram resultados similares em ambos modelos.

A Tabela 8 representa o EMQ 3D para a resultante tridimensional obtida para 5 dias secos.

TABELA 8 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
122	269,65	262,52	259,32	259,33	258,38	257,91	258,20	258,20
123	250,38	233,43	230,61	230,62	230,18	230,11	230,24	230,24
138	188,28	175,89	168,17	168,16	169,12	169,01	167,86	167,85
152	185,17	165,18	165,23	165,23	165,95	169,56	163,65	163,65
157	182,17	168,26	164,34	164,34	165,57	166,33	163,83	163,83
$\bar{X}$	<b>215,13</b>	<b>201,05</b>	<b>197,53</b>	<b>197,53</b>	<b>197,84</b>	<b>198,58</b>	<b>196,75</b>	<b>196,75</b>

Analisando a Tabela 8 é possível notar que melhores resultados para EMQ médio foram obtidos com os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1. Os modelos PNT/ECMWF mostraram melhoria de 0,4% (melhoria em média de 0,78 cm) em relação ao modelo teórico de Hopfield.

#### 4.1.1.3 Estação Inverno

Nesta seção testes foram realizados para a estação inverno. A Figura 41 apresenta a comparação entre os valores de EMQ da resultante planimétrica. Já a Figura 42 apresenta o EMQ da componente altimétrica.

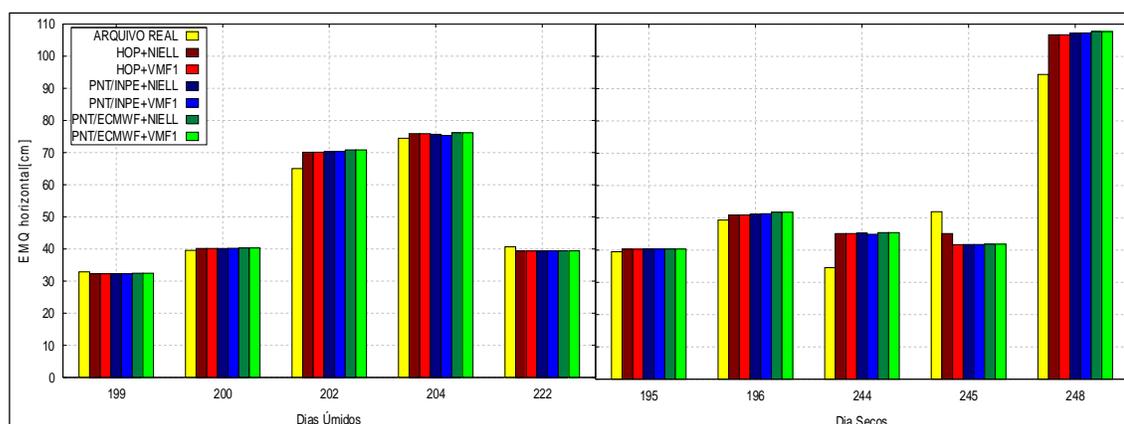


FIGURA 41 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO

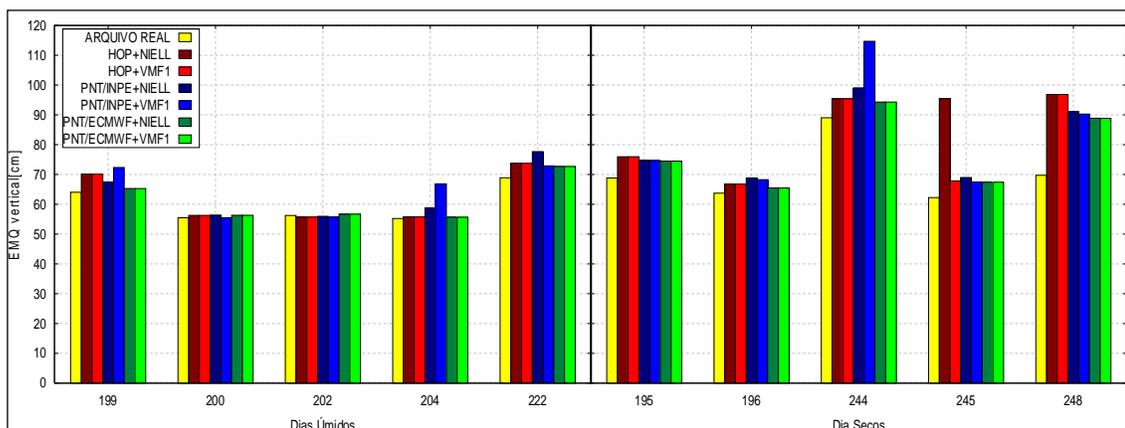


FIGURA 42 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO

Analisando as Figuras 41 e 42, é possível notar que os modelos apresentaram resultados semelhantes, porém os modelos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 apresentaram valores similares aos demais modos da VRS.

Na Figura 41 em dias úmidos, o EMQ das VRSs foi de 51,54 cm e 51,50 cm para as VRSs geradas nos modos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1, respectivamente. Uma vez que para os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 o valor médio do EMQ foi de 51,56 cm. Isso representa uma melhoria de 0,03% e 0,1% de PNT/INPE com relação ao método empírico de Hopfield. Com base na Figura 42 nota-se que a média do valor de EMQ foi semelhante na componente vertical para ambos os modelos. Mas, os modelos de PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 foram melhores que o de Hopfield, uma melhoria de 1,6% (média de 0,98 cm de melhoria).

Verificando os dias secos (Figura 41), é possível observar que melhores valores de EMQ foram encontrados no modo HOP+VMF1, em média 56,91 cm. Porém, para os modos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 o EMQ encontrado foi de 57,09 cm e 57,07 cm, respectivamente. Nota-se que HOP+VMF1 foi 0,3% (melhoria de 0,18 cm) e 0,28% (melhoria de 0,16 cm) melhor que os modelos de PNT/INPE, respectivamente. Já na componente altimétrica os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 mostram melhor desempenho para as VRSs geradas. Em média a melhoria foi de 9,2% e 3% sobre os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1, respectivamente.

A Tabela 9 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 9 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
199	71,97	80,66	77,17	77,16	74,74	79,21	72,90	72,90
200	68,15	73,62	69,14	69,14	69,22	68,49	69,25	69,25
202	85,97	98,20	89,51	89,52	89,80	89,65	90,72	90,72
204	92,72	100,53	94,16	94,15	95,76	100,70	94,33	94,32
222	80,01	85,82	83,58	83,58	87,06	82,85	82,66	82,66
$\bar{x}$	<b>79,76</b>	<b>87,76</b>	<b>82,71</b>	<b>82,71</b>	<b>83,32</b>	<b>84,18</b>	<b>81,97</b>	<b>81,97</b>

Avaliando a Tabela 9 pode-se perceber que as VRSs geradas nos modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 proporcionaram melhores valores de EMQ. Verifica-se que o modelo PNT/ECMWF apresentou EMQ em média de 81,97 cm, visto que para Hopfield o EMQ encontrado foi de 82,71 cm, o que representa uma melhoria de 1% (em média melhoria de 0,74 cm).

A Tabela 10 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 10 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
195	79,34	88,57	85,93	85,94	84,75	84,73	84,70	84,70
196	80,57	90,97	83,91	83,91	85,78	85,36	83,44	83,44
244	95,50	107,78	105,54	105,52	108,90	123,15	104,65	104,65
245	81,05	83,07	105,54	79,61	80,61	79,29	79,31	79,31
248	117,37	151,13	144,10	144,09	140,58	140,18	139,61	139,60
$\bar{x}$	<b>90,77</b>	<b>104,30</b>	<b>105,00</b>	<b>99,82</b>	<b>100,12</b>	<b>102,54</b>	<b>98,34</b>	<b>98,34</b>

Analisando a Tabela 10 é possível verificar que os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhor desempenho na avaliação do EMQ calculado. Os modos apresentaram melhoria de 6,3% (em média melhoria de 6,66 cm) e 1,5% (em média melhoria de 1,48%) melhores que os modos para Hopfield.

A Figura 43 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PP no modo cinemático. Já a Figura 44 representa o EMQ da componente altimétrica para o PP no modo cinemático.

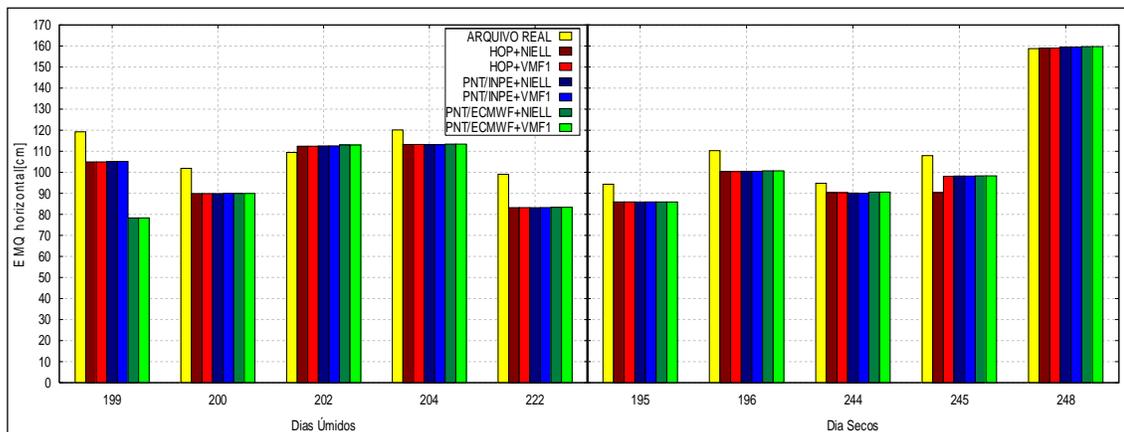


FIGURA 43 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO

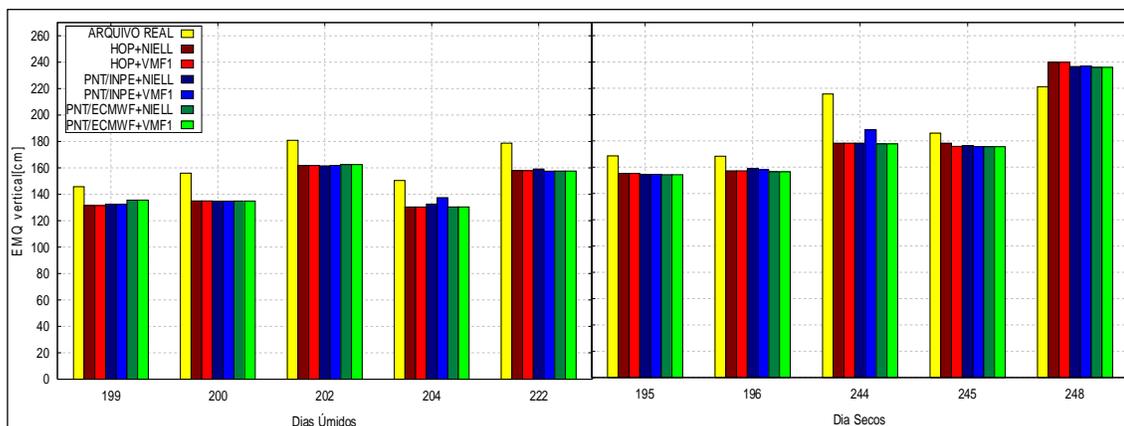


FIGURA 44 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO INVERNO

Analisando os dias úmidos na Figura 43, pode-se notar que a VRS gerada pelos modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhores resultados, e melhor qualidade que aqueles apresentados pelo modelo de Hopfield. Para a VRS gerada nos modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 o EMQ foi de 95,58 cm, sendo que para a VRS gerada por HOP+NIELL e HOP+VMF1 o EMQ foi 100,72 cm. Isso representa uma melhoria de 5,10% (em média melhoria de 0,91 cm) com o uso de PNT/ECMWF em relação ao modelo empírico de Hopfield.

Para dias secos, verifica-se que os modos HOP+NIELL apresentou melhor desempenho na geração de dados da VRS. O EMQ em média foi de 105,17 cm, por

outro lado o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou EMQ de 106, 80 cm, próximo a Hopfield.

Já para a componente vertical na Figura 44, o EMQ médio é de 144,09 cm para os modelos PNT/INPE+NIELL e com Hopfield 143,29 cm foram obtidos com o EMQ calculado. O modelo PNT/ECMWF foi ligeiramente pior que Hopfield, sendo essa melhoria de 0,5% (em média melhoria de 0,8 cm) com Hopfield.

Em períodos secos, nota-se que o modo PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhor desempenho, o EMQ obtido foi de 179,97 cm para ambos os modos. Com relação a HOP+NIELL e HOP+VMF1 as melhorias alcançadas foram de 0,96% e 0,7% ( em média melhoria de 1,7 cm e 1,25 cm) respectivamente.

A Tabela 11 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo cinemático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 11 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
199	188,30	175,89	168,17	168,16	169,12	169,00	156,59	156,59
200	186,30	164,50	162,18	162,18	162,04	162,06	162,14	162,14
202	211,41	207,00	196,99	196,99	196,83	197,14	197,90	197,90
204	192,49	179,29	172,69	172,69	174,23	177,96	172,83	172,83
222	204,35	182,83	178,44	178,45	179,55	178,18	178,30	178,30
$\bar{x}$	<b>196,57</b>	<b>181,90</b>	<b>175,69</b>	<b>175,69</b>	<b>176,35</b>	<b>176,87</b>	<b>173,55</b>	<b>173,55</b>

Verificando a Tabela 11, percebe-se que no método PP modo cinemático o EMQ encontrado com o modelo PNT/ECMWF foi ligeiramente melhor com relação ao modelo de Hopfield. A melhoria foi de 1,2% em média (melhoria de 2,14 cm). Além do mais, os modelos associados com as funções de Niell e VMF1 apresentaram valores de EMQ semelhantes no posicionamento.

A Tabela 12 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo cinemático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 12 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
195	193,15	178,45	177,38	177,38	176,62	176,72	176,56	176,56
196	201,23	189,91	186,47	186,47	187,81	187,11	186,09	186,09
244	235,53	202,95	199,80	199,79	199,75	208,72	199,45	199,45
245	214,88	203,58	199,80	201,32	201,88	201,20	201,19	201,19
248	272,27	286,33	287,66	287,66	285,24	285,40	284,84	284,84
$\bar{X}$	<b>223,41</b>	<b>212,24</b>	<b>210,22</b>	<b>210,52</b>	<b>210,26</b>	<b>211,83</b>	<b>209,63</b>	<b>209,63</b>

Analisando a Tabela 12 é possível concluir que as funções de mapeamento de Niell e VMF1 proporcionaram EMQ médio similar para o modelo PNT/ECMWF. Além disso, o modelo PNT/ECMWF proporcionou melhores resultados de EMQ médio que o modelo de Hopfield. As melhorias alcançadas foram de 0,3% e 0,4% com relação a Hopfield.

#### 4.1.1.4 Estação Primavera

Finalizando, nessa seção realizaram-se testes para o período da estação primavera. A Figura 45 apresenta a comparação entre os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com o processamento dos dados do arquivo real e das VRs geradas. A Figura 46 apresenta o EMQ da componente altimétrica.

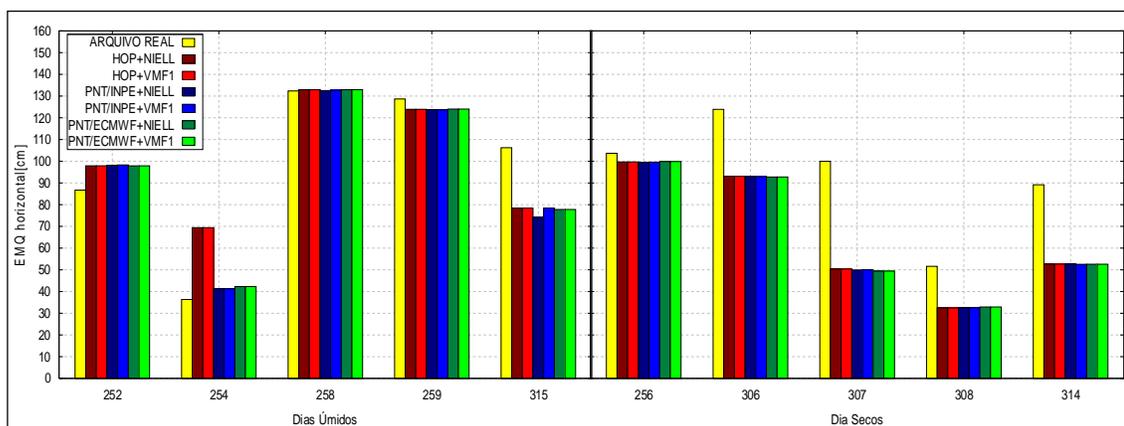


FIGURA 45 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA

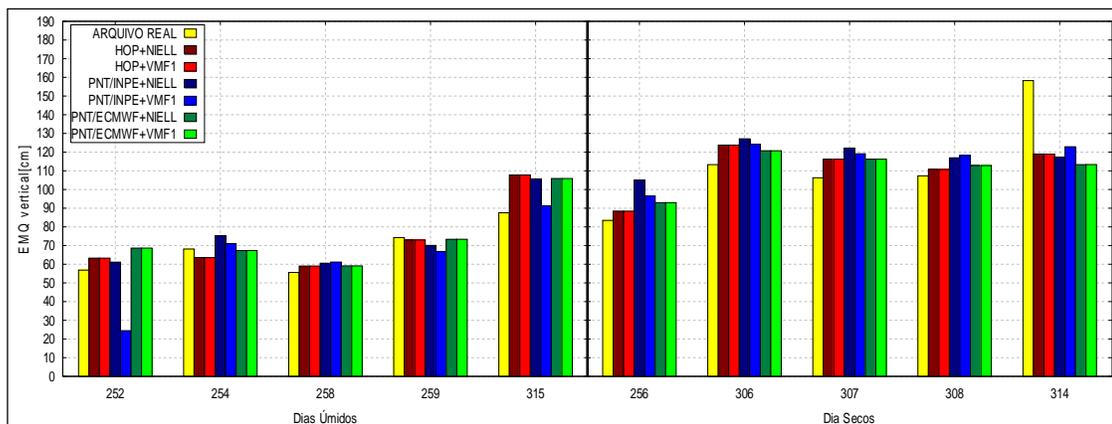


FIGURA 46 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA

Analisando a Figura 45, é possível notar que os melhores resultados para a VRS foram encontrados no modo PNT/INPE+NIELL para dias úmidos. O EMQ do modo PNT/INPE+NIELL da resultante planimétrica é em média 93,94 cm. Já para a VRS gerada nos modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 apresentaram EMQ discrepante de 100,50 cm. Isso representa uma melhoria na média geral de 6,5% com emprego de PNT/INPE ao invés do modelo de Hopfield (média de 6,56 cm de melhoria). Com relação aos modos PNT/ECMWF os valores de EMQ foram semelhantes ao de PNT/INPE. Para dias secos, resultados similares foram obtidos com os modos PNT/INPE+NIELL, PNT/INPE+VMF1, PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1. Mas, o modelo PNT/INPE+NIELL apresentou EMQ na componente horizontal de 65,47 cm, enquanto com Hopfield o EMQ foi de 65,62 cm para ambos os modos. Assim, Hopfield foi 0,23% pior que PNT/INPE+NIELL.

Com base na Figura 46, para a componente vertical o melhor valor de EMQ médio foi encontrado no modo PNT/INPE+VMF1, que em média foi de 62,95 cm. Já com os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 o EMQ médio obtido foi de 73,30 cm. Isso significa uma melhoria de 14,1% (em média melhoria de 10,35 cm) quando modelos de PNT/INPE são empregados ao invés do modelo de Hopfield. Para os dias secos, nota-se que os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhores valores de EMQ. Na média os modos apresentaram 111,21 cm de EMQ, em contrapartida com aplicação dos modos para Hopfield o EMQ foi de 111,64 cm. Assim, o modelo de PNT/ECMWF foi 0,4% (melhoria de 0,43 cm) melhor que Hopfield.

A Tabela 13 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 13 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP ESTÁTICO MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
252	103,68	120,96	116,54	116,54	115,56	101,29	119,54	119,55
254	77,21	83,42	94,11	94,11	85,78	82,18	79,51	79,51
258	143,55	149,64	145,45	145,45	145,67	146,04	145,50	145,50
259	148,55	147,07	143,76	143,76	142,19	140,55	144,09	144,09
315	137,65	128,96	133,24	133,24	129,05	120,32	131,37	131,37
$\bar{x}$	<b>122,13</b>	<b>126,01</b>	<b>126,62</b>	<b>126,62</b>	<b>123,65</b>	<b>118,08</b>	<b>124,00</b>	<b>124,00</b>

Analisando a Tabela 13, percebe-se que com relação ao modelo de Hopfield, o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou melhoria de 6,7% (em média melhoria de 8,5 cm). Já com relação ao modelo PNT/ECMWF, o modo PNT/INPE+VMF1 mostrou-se 4,8% melhor.

A Tabela 14 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 14 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
256	133,04	137,00	133,25	133,24	144,67	138,69	136,43	136,43
306	167,89	153,18	154,84	154,84	157,39	155,08	152,25	152,24
307	145,89	123,34	126,68	126,68	131,99	129,19	126,27	126,27
308	119,08	117,78	115,36	115,35	121,40	122,55	117,51	117,50
314	181,67	130,43	130,11	130,04	128,53	133,63	124,93	124,95
$\bar{x}$	<b>149,51</b>	<b>132,35</b>	<b>132,05</b>	<b>132,03</b>	<b>136,80</b>	<b>135,83</b>	<b>131,48</b>	<b>131,48</b>

Avaliando a Tabela 14 é possível notar que melhores resultados foram obtidos com os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1. Verifica-se que o EMQ encontrado foi de 131,48 cm, por outro lado o modo HOP+NIELL apresentou EMQ de 132,05 cm, o que significa uma melhoria de 0,43% (em média melhoria de 0,57 cm).

A Figura 47 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PP modo cinemático. A Figura 48 representa o EMQ da componente altimétrica.

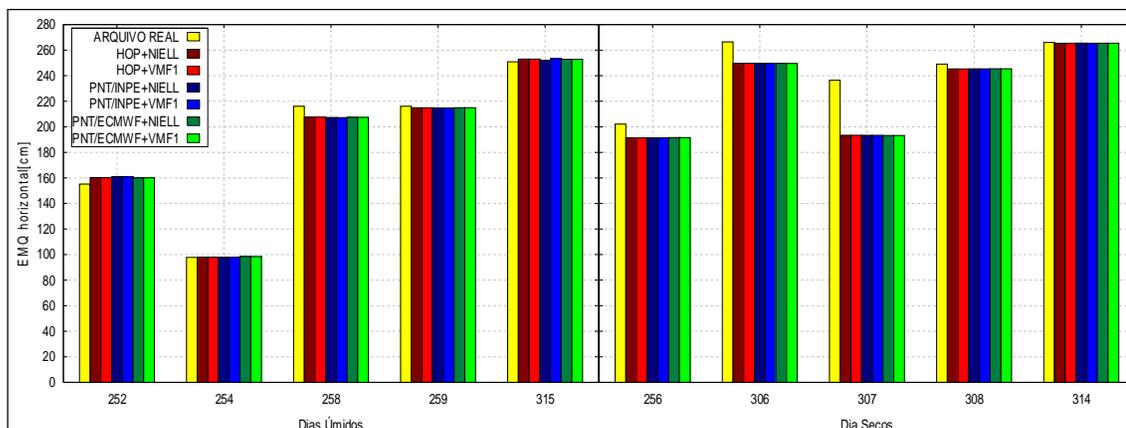


FIGURA 47 – EMQ DA RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA

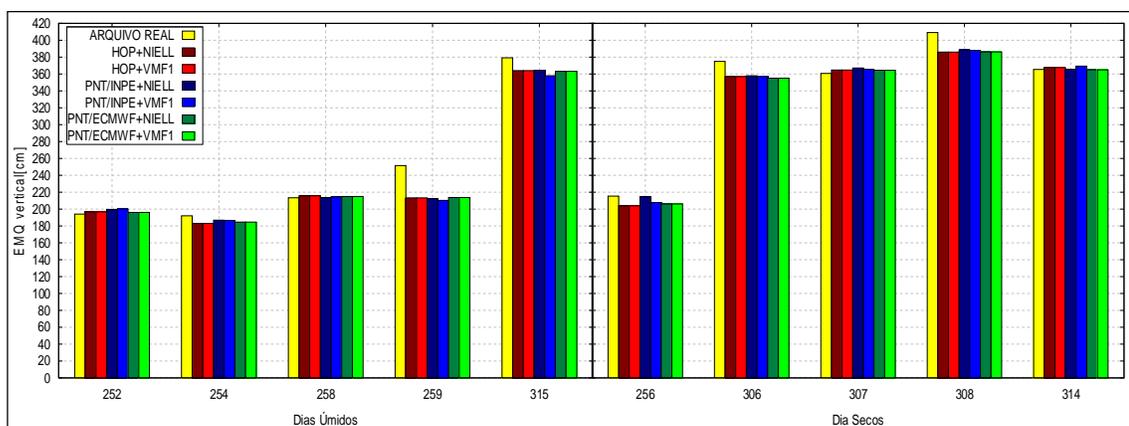


FIGURA 48 – EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO PARA A ESTAÇÃO PRIMAVERA

Com base nos dados da Figura 47 e da Figura 48 para dias úmidos, observa-se que com o uso dos modelos de PNT/INPE+VMF1 a média do EMQ resultante foi de 186,53 cm e 233,86 cm, nas componentes horizontal e vertical, respectivamente. Por outro lado, com a aplicação do modelo de Hopfield a média do EMQ foi de 186,74 cm na componente horizontal e 234,53 cm para a vertical, o que caracteriza melhorias de 0,1% na componente horizontal (média de 0,2 cm de melhoria) e 0,3% para a vertical (média de 0,67 cm de melhoria).

Na Figura 47, observa-se que para dias secos os valores de EMQ obtidos foram similares para os diferentes modelos. As médias do EMQ resultante para Hopfield, PNT/INPE e PNT/ECMWF foram, respectivamente, 229,04 cm (para os 2 primeiros) e 229,05 cm.

Analisando o EMQ vertical apresentado na Figura 48, verifica-se que os valores obtidos por PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foram melhores que o EMQ obtido para Hopfield. As médias do EMQ resultante para PNT/ECMWF foram de 335,36 cm, já para Hopfield a média foi de 335,83 cm. O que representa uma melhoria de 0,1% com aplicação de PNT/ECMWF ao invés de Hopfield. A Tabela 15 representa a resultante altimétrica do EMQ para dias úmidos.

TABELA 15 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
252	248,48	258,01	253,73	253,73	256,21	256,58	253,10	253,10
254	215,51	211,75	207,46	207,46	210,91	210,55	209,19	209,19
258	303,72	299,07	299,37	299,37	297,75	298,30	298,64	298,64
259	331,63	307,03	302,79	302,79	302,06	300,54	303,15	303,15
315	454,71	440,54	443,31	443,31	443,08	438,46	442,49	442,49
$\bar{x}$	<b>310,81</b>	<b>303,28</b>	<b>301,33</b>	<b>301,33</b>	<b>302,00</b>	<b>300,89</b>	<b>301,31</b>	<b>301,31</b>

Analisando Tabela 15, percebe-se que no método PP modo cinemático o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou melhor desempenho. O EMQ que era 301,33 no modelo teórico de Hopfield passou para 300,89 com o modelo PNT/INPE. Isso representa uma melhoria de 0,15% (em média melhoria de 0,44 cm). A Tabela 16 representa a resultante altimétrica do EMQ para dias secos.

TABELA 16 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
256	295,37	283,55	279,66	279,66	287,47	282,48	281,39	281,39
306	460,03	430,78	435,54	435,54	436,36	435,46	434,00	434,00
307	431,28	410,48	412,84	412,84	414,93	413,44	412,51	412,51
308	478,97	454,91	457,34	457,34	459,38	459,07	457,56	457,56
314	452,04	452,93	453,42	453,42	451,83	454,84	451,31	451,31
$\bar{x}$	<b>422,69</b>	<b>405,24</b>	<b>406,50</b>	<b>406,50</b>	<b>408,87</b>	<b>407,85</b>	<b>406,11</b>	<b>406,11</b>

Analisando os dados da Tabela 16 é possível concluir que os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 mostraram melhor desempenho,

obtendo valor médio de EMQ de 406,11 cm. Já em relação a aos modos para Hopfield, o EMQ médio foi de 406,50 cm. Portanto, isso representa uma melhoria de 0,09% com uso de PNT/ECMWF ao invés da modelagem empírica de Hopfield.

#### 4.1.2 Posicionamento por Ponto Preciso

Para gerar a VRS no método de posicionamento PPP os arquivos RINEX possuíam além da observável C1(código C/A) utilizada no método PP, o código P2 e as portadoras L1 e L2. A metodologia de processamento utilizada foi a mesma empregada no PP, com uso do software online CSRS-PPP do PPP NRCan.

##### 4.1.2.1 Estação Verão

A Figura 49 apresenta os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com o processamento dos dados do arquivo real e das VRSs geradas (HOP+NIELL, HOP+VMF1, PNT/INPE+NIELL, PNT/INPE+VMF1, PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1) no método PPP. Já a Figura 50 apresenta o EMQ da componente altimétrica.

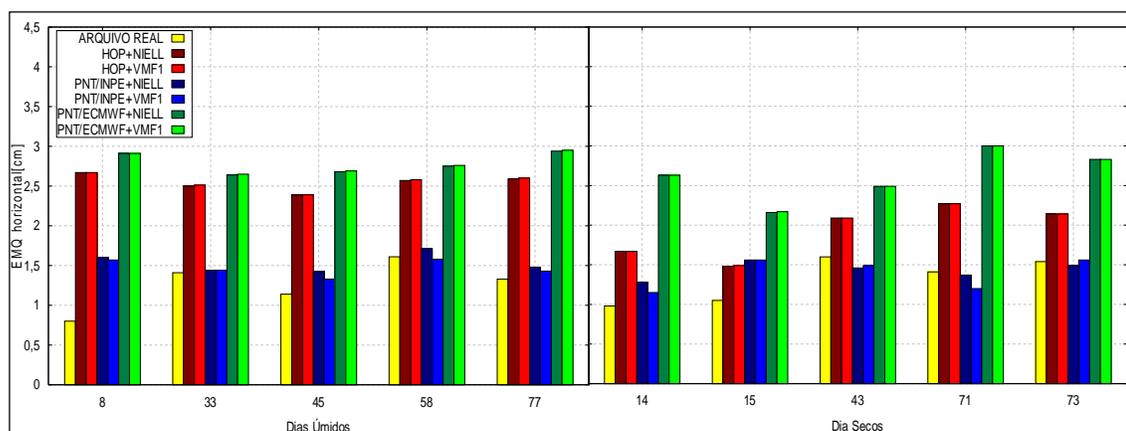


FIGURA 49 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO

Analisando o EMQ horizontal apresentado Figura 49, verifica-se que os valores obtidos por PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 apresentaram melhor desempenho que os modelos HOP+NIELL e HOP+VMF1. O EMQ que em média era 2,55 cm passou para 1,56 cm e 1,47 cm. O que representa uma melhoria de 38,8% e 42,3% (em média melhoria de 1 cm e 1,1 cm), para PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF, respectivamente.

Para os dias secos, os testes realizados mostraram melhor desempenho para os modos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1, cujo EMQ obtido foi de 1,43 cm e 1,39 cm, respectivamente. Já com Hopfield a média de EMQ foi de 1,93 cm. Isso significa uma melhoria de 26% e 28% (em média melhoria de 0,5 cm e 0,54 cm) com o uso de PNT/INPE ao invés de Hopfield, consecutivamente.

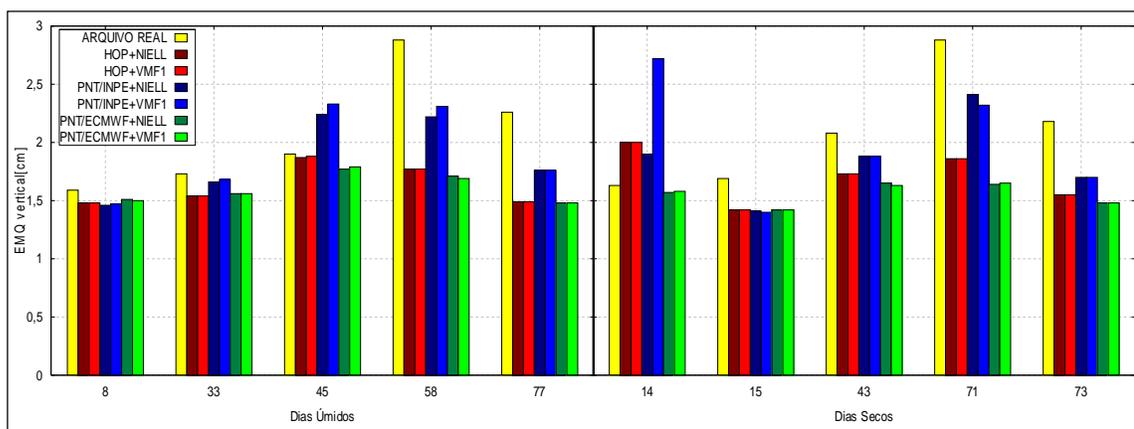


FIGURA 50 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO

De acordo com a Figura 50, na componente vertical os valores de EMQ obtidos para PNT/ECMWF+NIELL, PNT/ECMWF+VMF1, HOP+NIELL e HOP+VMF1 foram similares. As médias do EMQ para PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foram, respectivamente, 1,60 cm e 1,61 cm. Mas, os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foram ligeiramente melhores que o de Hopfield, uma melhoria de 1,8% (média de 0,03 cm de melhoria).

Analisando o componente vertical para dias secos, é possível notar que os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 apresentaram melhores resultados. O EMQ em média passou de 1,71 cm com emprego dos modos HOP+NIELL e HOP+VMF1, para 1,55 cm com aplicação dos modelos de PNT/ECMWF. Uma melhoria de 9,35% (em média melhoria de 0,16 cm) foi obtida com uso de PNT/ECMWF.

A Tabela 17 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 17 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
8	1,78	23,22	3,05	3,05	2,17	2,15	3,28	3,27
33	2,23	43,10	2,94	2,94	2,24	2,21	3,07	3,08
45	2,22	39,73	3,03	3,04	2,65	2,68	3,21	3,23
58	3,30	52,81	3,12	3,13	2,80	2,80	3,24	3,24
77	2,62	40,47	2,99	3,00	2,34	2,27	3,29	3,30
$\bar{x}$	<b>2,43</b>	<b>39,87</b>	<b>3,03</b>	<b>3,03</b>	<b>2,44</b>	<b>2,42</b>	<b>3,22</b>	<b>3,22</b>

Analisando a Tabela 17 pode-se perceber grande melhoria quando os modos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 são aplicados, o EMQ que em média era 3,03 cm para Hopfield passou para 2,44 cm e 2,42 cm, respectivamente (melhoria de 0,6 cm).

A Tabela 18 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 18 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
14	1,90	23,72	2,61	2,61	2,29	2,95	3,06	3,07
15	1,99	25,97	2,05	2,06	2,10	2,10	2,58	2,59
43	2,62	42,56	2,71	2,71	2,38	2,40	2,99	2,98
71	3,21	52,25	2,93	2,93	2,77	2,61	3,42	3,42
73	2,67	43,06	2,64	2,64	2,26	2,31	3,19	3,19
$\bar{x}$	<b>2,48</b>	<b>37,51</b>	<b>2,59</b>	<b>2,59</b>	<b>2,36</b>	<b>2,47</b>	<b>3,05</b>	<b>3,05</b>

Como pode ser observado na Tabela 18, os resultados obtidos com PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF+VMF1 foram similares. Melhores resultados foram obtidos com PNT/INPE+NIELL. O EMQ que é 2,59 com a VRS gerada com modelagem empírica de Hopfield passou para 2,36 cm quando aplicado correções

para troposfera usando o modo PNT/INPE+NIELL. A melhoria atingida foi de 8,9% (melhoria em média 0,23 cm) com PNT/INPE+NIELL.

A Figura 51 e apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PPP no modo cinemático. Já a Figura 52 representa o EMQ da componente altimétrica.

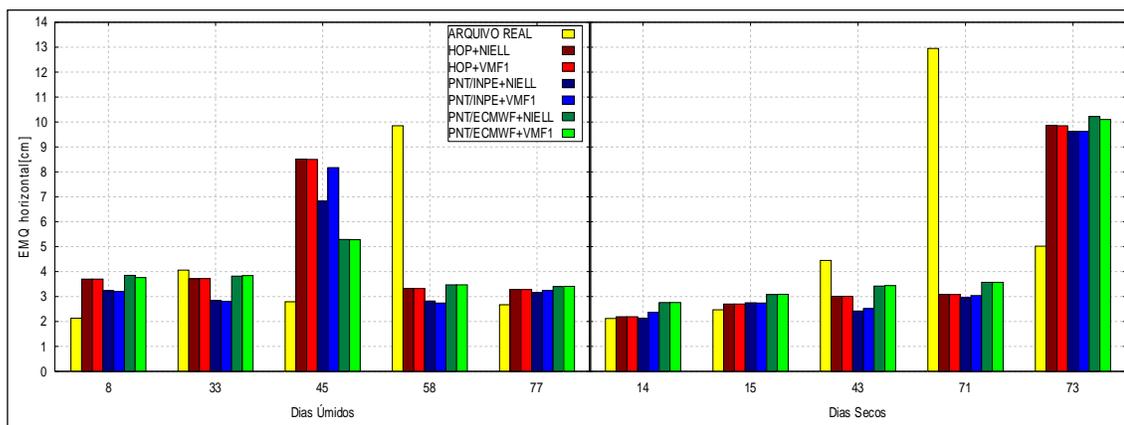


FIGURA 51 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO

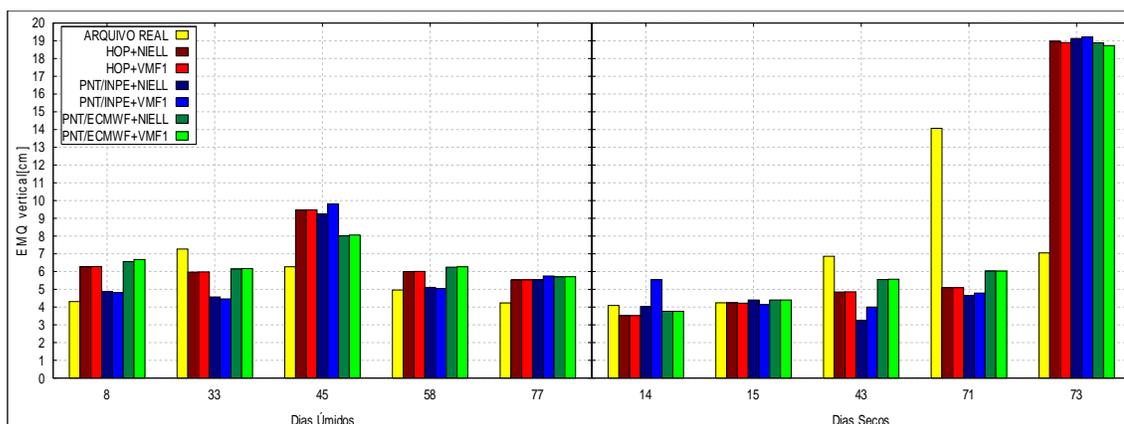


FIGURA 52 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE VERÃO

Analisando os dados da Figura 51 e Figura 52, observa-se que com o uso dos modelos de PNT/INPE+NIELL a média do EMQ resultante foi de 3,37 cm e 5,87 cm, nas componentes horizontal e vertical, respectivamente. Por outro lado, com a aplicação dos modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 a média do EMQ foi de 4,50 cm na componente horizontal e 6,65 cm para a vertical, o que caracteriza melhorias de 25,1% (em média melhoria de 1,13 cm) e 11,7% para a vertical (média de 0,78 cm de melhoria).

Verificando os dias secos Figura 51, pode-se concluir que o modelo PNT/INPE+NIELL apresentou melhores resultados. O EMQ com PNT/INPE+NIELL

foi de 3,97 cm, por outro lado com Hopfield o EMQ foi de 4,17 cm. Uma melhoria de 4,8% foi atingida com PNT/INPE+NIELL. Para a componente vertical, assim como na resultante planimétrica o modo PNT/INPE+NIELL também apresentou melhorias significativas. O EMQ em média passou de 7,32 cm com uso de Hopfield para 7,09 cm com aplicação de PNT/INPE+NIELL (uma melhoria de 3,14% foi obtida).

A Tabela 19 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo cinemático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 19 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
8	4,81	97,80	7,28	7,29	5,85	5,78	7,61	7,67
33	8,33	91,43	7,03	7,04	5,38	5,27	7,23	7,27
45	6,86	105,15	12,72	12,73	11,48	15,84	9,60	9,64
58	11,03	162,67	6,86	6,87	5,84	5,75	7,15	7,17
77	5,00	113,99	6,42	6,43	6,36	6,60	6,64	6,65
$\bar{x}$	<b>7,21</b>	<b>114,21</b>	<b>8,06</b>	<b>8,07</b>	<b>6,98</b>	<b>7,84</b>	<b>7,64</b>	<b>7,68</b>

Observando a Tabela 19, pode-se notar que da mesma forma que no método estático, a VRS gerada pelo modo PNT/INPE+NIELL apresentou melhores resultados. Verifica-se que com o uso dos modelos de PNT/INPE a média do EMQ da resultante 3D de 8,07 cm passou para 6,98 cm. Isso representa uma melhoria de 13,5% (em média melhoria de 1,09 cm) com aplicação de PNT/INPE em relação a Hopfield.

A Tabela 20 representa o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo cinemático e a média alcançada para os 5 dias secos.

TABELA 20 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO VERÃO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
14	4,61	76,55	4,15	4,15	4,55	6,02	4,66	4,66
15	4,91	145,48	5,02	5,01	5,19	4,96	5,37	5,38
43	8,18	103,01	5,71	5,72	4,04	4,72	6,52	6,55
71	19,12	61,24	5,95	5,95	5,51	5,67	7,00	7,00
73	8,65	127,95	21,37	21,31	21,41	21,48	21,48	21,28
$\bar{X}$	<b>9,09</b>	<b>102,85</b>	<b>8,44</b>	<b>8,43</b>	<b>8,14</b>	<b>8,57</b>	<b>9,01</b>	<b>8,97</b>

Com base na Tabela 20, nota-se que o modo PNT/INPE+NIELL foi melhor em relação aos demais modelos para troposfera. O PNT/INPE+NIELL atingiu EMQ de 8,14 cm, em contrapartida com uso de HOP+NIELL o EMQ foi de 8,44 cm. De maneira geral, o modo PNT/INPE+NIELL foi 3,5% melhor que Hopfield.

#### 4.1.2.2 Estação Outono

A Figura 53 apresenta os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com o processamento dos dados do arquivo real e das VRSs geradas. A Figura 54 apresenta o EMQ da componente altimétrica.

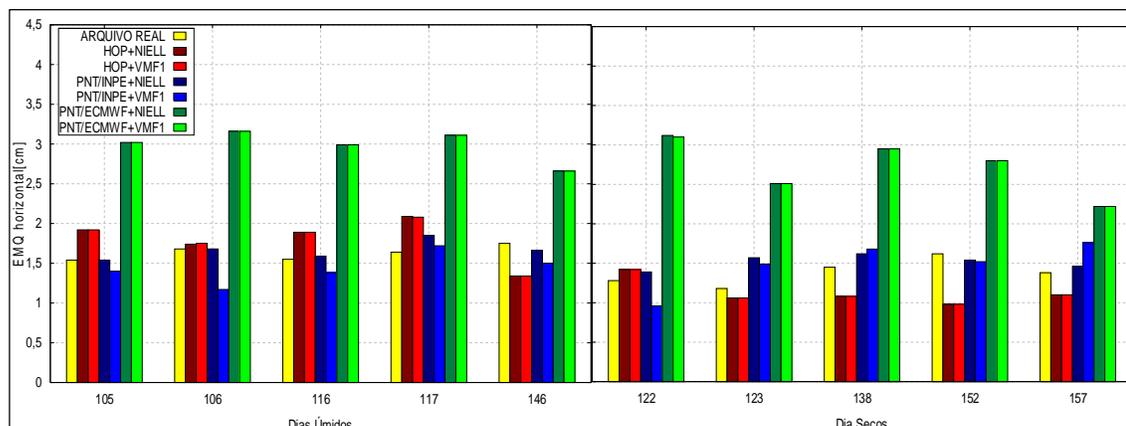


FIGURA 53 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO

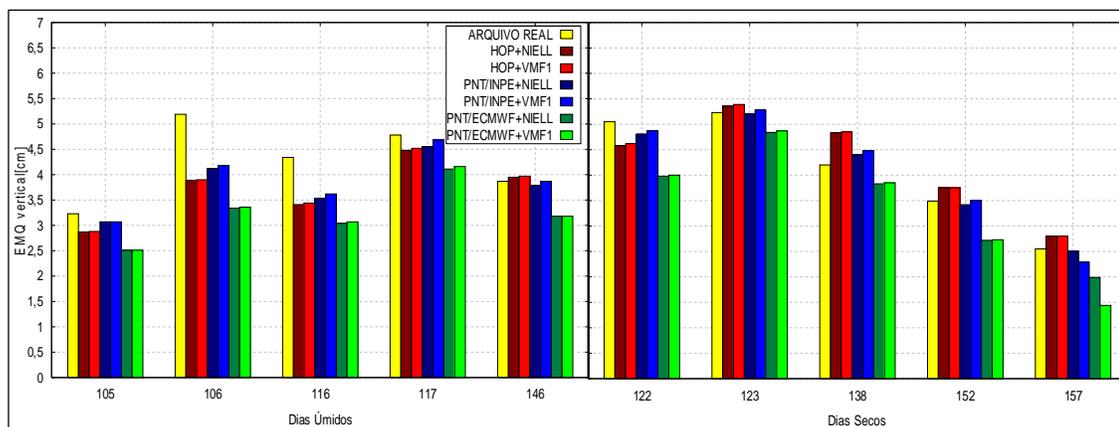


FIGURA 54 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO

Analisando a Figura 53, é possível observar que os melhores resultados para a VRS foram encontrados com o modo PNT/INPE+VMF1 em dias úmidos. O EMQ do arquivo real é em média 1,63 cm. Já para a VRS o EMQ é de 1,43 cm para a VRS gerada por PNT/INPE+VMF1. Por outro lado, os modos para Hopfield apresentaram 1,80 cm de EMQ na componente horizontal. Isso representa um avanço de 12,3% com aplicação de PNT/INPE ao invés do modelo Hopfield.

Em dias secos, é possível notar que os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 apresentaram melhores valores de EMQ. Em média o EMQ obtido foi de 1,13 cm na componente horizontal, já com PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE +VMF1 o EMQ adquirido foi de 1,52 cm e 1,48 cm, respectivamente. Isso representa uma vantagem de 25,6% e 23,6% (melhoria de 0,39 cm e 0,35 cm) com uso de Hopfield ao invés de PNT/INPE, respectivamente.

Para a componente vertical (Figura 54) melhores valores de EMQ médio foram encontrados no modo PNT/ECMWF para dias úmidos. A média encontrada foi de 3,25 cm, em contrapartida o modo HOP+NIELL o EMQ foi de 3,72 cm, o que implica em uma melhoria de 12,6% com o uso do modelo de PNT/ECMWF. Para os dias secos, nota-se que o modo PNT/ECMWF+VMF1 apresentou melhor desempenho que HOP+NIELL. O EMQ que é 4,26 cm para HOP+NIELL passou para 3,38 cm com aplicação de PNT/ECMWF+VMF1 (em média melhoria de 20,6%).

A Tabela 21 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 21 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
105	3,58	27,85	3,45	3,46	3,43	3,37	3,93	3,93
106	5,46	36,87	4,26	4,27	4,45	4,34	4,60	4,61
116	4,61	39,02	3,90	3,93	3,87	3,87	4,26	4,29
117	5,05	38,82	4,94	4,98	4,91	4,99	5,15	5,19
146	4,25	25,45	4,17	4,19	4,14	4,15	4,15	4,15
$\bar{x}$	<b>4,59</b>	<b>33,60</b>	<b>4,15</b>	<b>4,17</b>	<b>4,16</b>	<b>4,15</b>	<b>4,42</b>	<b>4,43</b>

Analisando a Tabela 21, nota-se que em média o valor de EMQ foi similar na componente horizontal para ambos os modelos de Hopfield e PNT/INPE.

A Tabela 22 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 22 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
122	5,21	27,36	4,80	4,83	5,01	4,96	5,06	5,06
123	5,36	26,86	5,45	5,49	5,43	5,49	5,45	5,48
138	4,44	41,13	4,95	4,97	4,69	4,78	4,83	4,85
152	3,85	41,40	3,88	3,88	3,75	3,82	3,90	3,91
157	2,90	20,41	3,01	3,01	2,90	2,89	2,98	2,65
$\bar{x}$	<b>4,35</b>	<b>31,43</b>	<b>4,42</b>	<b>4,44</b>	<b>4,35</b>	<b>4,39</b>	<b>4,45</b>	<b>4,39</b>

Observando a Tabela 22 pode-se notar melhoria quando os modelos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 são aplicados. O EMQ para o modo PNT/INPE+NIELL é de 4,35 cm, já com HOP+NIELL e HOP+VMF1 o EMQ obtido foi de 4,42 cm e 4,44 cm, respectivamente. Logo, melhorias com uso de PNT/INPE+NIELL foram da ordem de 1,6% e 2% (melhoria de 0,07 cm e 0,09 cm).

A Figura 55 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PPP modo cinemático. A Figura 56 representa o EMQ da componente altimétrica.

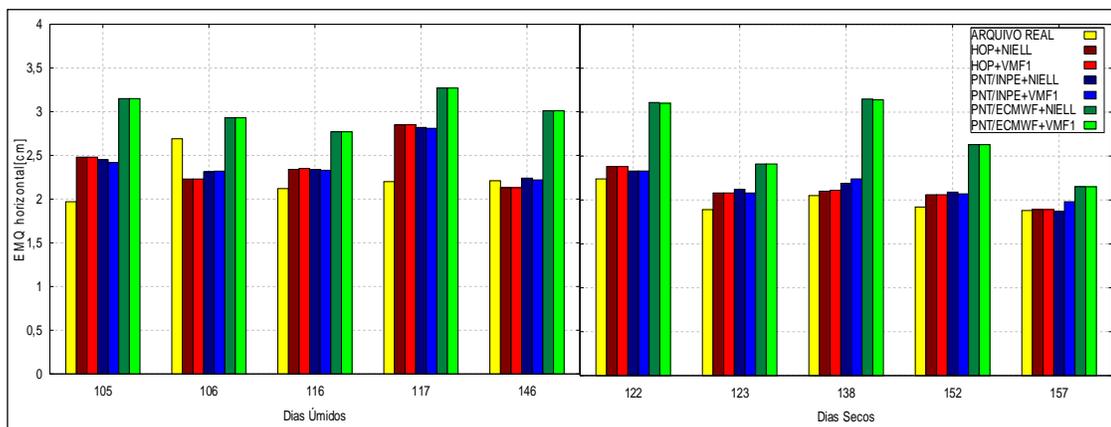


FIGURA 55 – EMQ CALCULADO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO

Observando as Figura 55, nota-se que da mesma forma que no método estático, a VRS gerada pelos modos PNT/INPE+VMF1 apresentou melhor resultado. Além disso, esses resultados também se assemelham por aqueles apresentados pelo arquivo real. O EMQ do modo PNT/INPE+VMF1 foi em média 2,42 cm. Por outro lado a VRS gerada por Hopfield apresentou 2,41 cm na média do EMQ, o que representa uma suave vantagem de 0,4% (piora de 0,01cm em média) em relação ao modo PNT/INPE+VMF1.

Para dias secos, observa-se que os modos HOP+NIELL, HOP+VMF1, PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 apresentaram valores de EMQ similares para a componente horizontal. A média obtida foi de 2,10 cm para HOP+NIELL e HOP+VMF1, com o modo PNT/INPE+NIELL obteve-se valor de 2,12 cm, ligeiramente pior que Hopfield. Em média a piora foi de 0,9% (em média 0,02 cm).

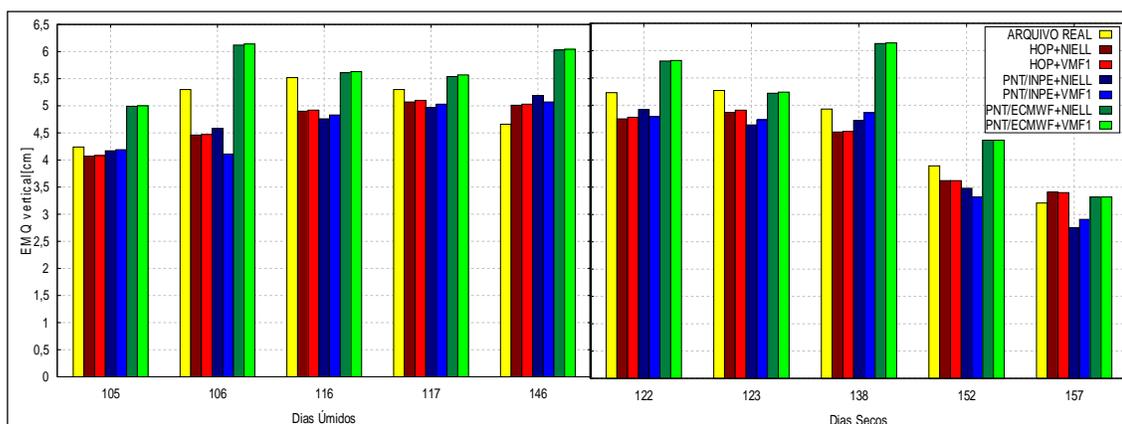


FIGURA 56 – EMQ CALCULADO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO EM PERÍODO DE OUTONO

Para a componente vertical na Figura 56 o EMQ médio foi de 4,72 cm para o modo HOP+NIELL. Porém, percebe-se considerável melhoria com emprego do modo PNT/INPE+VMF1 que proporcionou EMQ médio de 4,65 cm. O que significa uma melhoria de 1,5% (em média melhoria de 0,07 cm) com uso de PNT/INPE. Para dias secos, nota-se que o modo PNT/INPE+VMF1 foi melhor que Hopfield. Uma melhoria de 3,5% foi obtida com relação aos modos para Hopfield (em média 0,15 cm de melhoria). A Tabela 23 representa a resultante 3D para a VRS gerada no modo PPP cinemático para dias úmidos.

TABELA 23 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
105	4,68	84,26	4,77	4,77	4,84	4,84	5,90	5,91
106	5,94	89,40	4,99	5,00	5,13	4,72	6,79	6,80
116	5,91	40,34	5,43	5,45	5,30	5,36	6,26	6,27
117	5,74	72,99	5,82	5,84	5,71	5,76	6,43	6,46
146	5,16	120,06	5,44	5,46	5,65	5,53	6,74	6,75
$\bar{x}$	<b>5,49</b>	<b>81,41</b>	<b>5,29</b>	<b>5,31</b>	<b>5,33</b>	<b>5,24</b>	<b>6,42</b>	<b>6,44</b>

Verificando a Tabela 23, é possível notar que o modo PNT/INPE+VMF1 proporcionou melhores valores de EMQ médio para resultante 3D. Em média o EMQ calculado de 5,24 cm foi 1,3% e 0,9% melhor que os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 (em média melhoria de 0,07 cm e 0,05 cm), respectivamente.

A Tabela 24 representa a resultante 3D para a VRS gerada no modo PPP cinemático para dias secos.

TABELA 24 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO OUTONO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
122	5,69	132,22	5,31	5,34	5,44	5,33	6,59	6,59
123	5,60	79,83	5,30	5,33	5,10	5,17	5,75	5,77
138	5,34	116,21	4,97	4,99	5,20	5,35	6,89	6,90
152	4,34	72,19	4,17	4,17	4,06	3,91	5,09	5,09
157	3,72	111,91	3,90	3,89	3,33	3,52	3,96	3,96
$\bar{x}$	<b>4,94</b>	<b>102,47</b>	<b>4,73</b>	<b>4,74</b>	<b>4,63</b>	<b>4,66</b>	<b>5,66</b>	<b>5,66</b>

Com base nos dados da Tabela 24, é possível notar que melhores resultados para a VRS foram conseguidos com o modo PNT/INPE+NIELL. A conclusão a que se chega é que as melhorias de 2,1% e 2,3% foram atingidas com a aplicação de PNT/INPE+NIELL em relação aos modelos de HOP+NIELL e HOP+VMF1, respectivamente.

#### 4.1.2.3 Estação Inverno

Nesta seção realizaram-se experimentos em amostras para a estação inverno. A Figura 57 apresenta a comparação entre os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com o processamento dos dados do arquivo real e das VRSs geradas. A Figura 58 representa o EMQ da componente altimétrica.

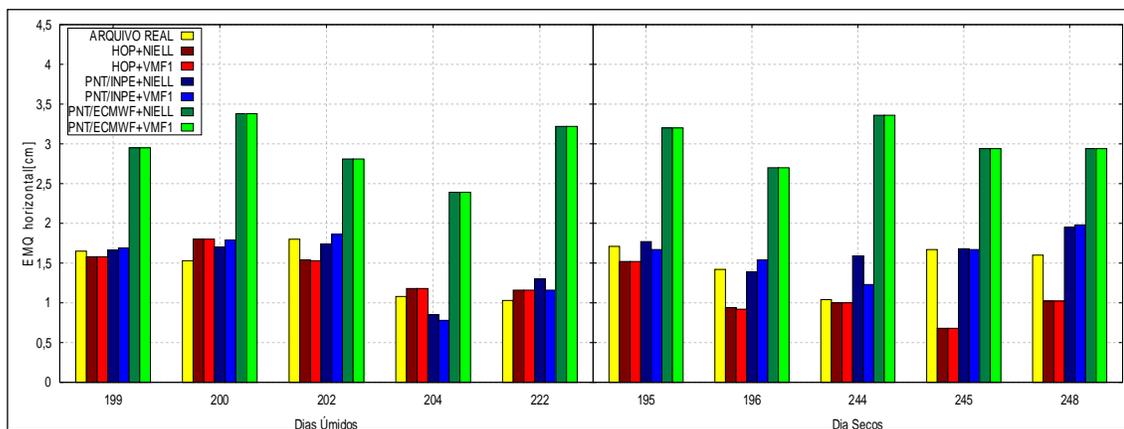


FIGURA 57 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO

Analisando a Figura 57 em dias úmidos, nota-se que a média do valor de EMQ foi similar na componente horizontal para ambos os modelos HOP+NIELL, HOP+VMF1, PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1. Para os dias secos, nota-se que melhores resultados foram obtidos com HOP+NIELL e HOP+VMF1, cujo EMQ em média foi 1,03 cm. Logo, com PNT/INPE+VMF1 o EMQ obtido foi de 1,62 cm, isso representa uma melhoria de 36,4% com uso de Hopfield.

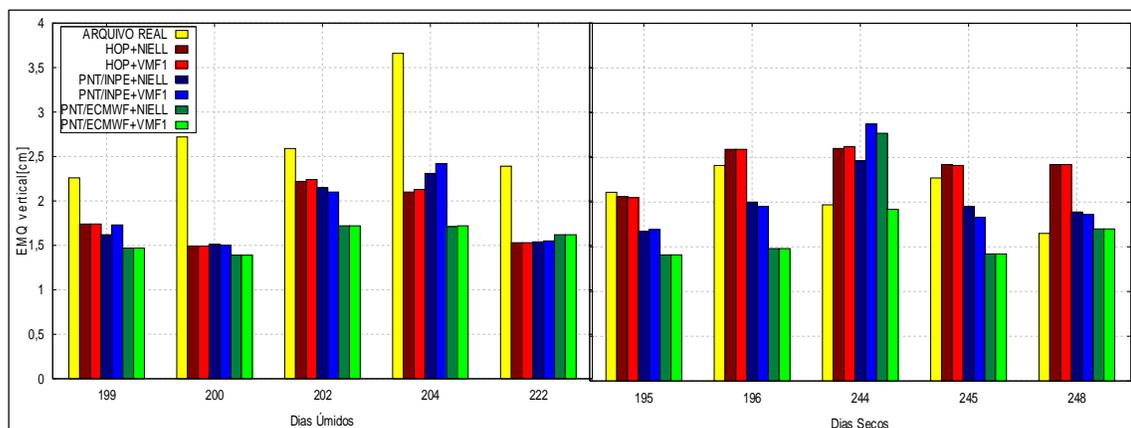


FIGURA 58 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO

Observando a Figura 58 verifica-se que de forma geral, o modelo de HOP+NIELL apresentou-se ligeiramente melhor desempenho para a componente vertical (dias úmidos), visto que o valor médio do EMQ obtido com PNT/INPE+NIELL foi de 1,83 cm, mas com HOP+NIELL foi de 1,82 cm. Isso representa uma piora de 0,5% na média geral de PNT/INPE+NIELL com relação ao método empírico de Hopfield (média de 0,01 cm de redução).

Avaliando a componente vertical para dias secos, é possível verificar que o modo PNT/INPE+NIELL apresentou melhor desempenho. O EMQ em média é de 1,99 cm para PNT/INPE+NIELL e, em contrapartida para Hopfield o EMQ encontrado foi de 2,42 cm. Uma melhoria de 17,7% foi obtida com uso de PNT/INPE+NIELL.

A Tabela 25 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 25 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
199	2,80	50,09	2,35	2,35	2,32	2,42	3,30	3,30
200	3,12	49,47	2,34	2,34	2,27	2,34	3,65	3,65
202	3,15	27,86	2,70	2,71	2,77	2,81	3,29	3,29
204	3,82	36,58	2,41	2,44	2,46	2,54	2,94	2,94
222	2,60	42,49	1,92	1,92	2,02	1,94	3,60	3,60
$\bar{x}$	<b>3,10</b>	<b>41,30</b>	<b>2,34</b>	<b>2,35</b>	<b>2,37</b>	<b>2,41</b>	<b>3,36</b>	<b>3,36</b>

Avaliando a Tabela 25 pode-se perceber certa semelhança de EMQ da VRS no modo HOP+NIELL, HOP+VMF1, PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 entre si. Além de apresentar melhores resultados em relação ao arquivo real, o EMQ apresentou grande melhoria que em média era 41,30 cm passou para 2,34 cm quando empregado modelos para troposfera. Ademais, as funções de mapeamento de Niell e VMF1 proporcionaram resultados similares na determinação do atraso troposférico inclinado.

A Tabela 26 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 26 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
195	2,72	47,49	2,56	2,55	2,43	2,38	3,50	3,50
196	2,80	41,05	2,76	2,75	2,44	2,48	3,08	3,08
244	2,23	18,64	2,79	2,80	2,93	3,12	4,35	3,87
245	2,82	16,30	2,51	2,50	2,57	2,48	3,26	3,26
248	2,30	34,19	2,63	2,63	2,72	2,72	3,40	3,40
$\bar{X}$	<b>2,57</b>	<b>31,54</b>	<b>2,65</b>	<b>2,65</b>	<b>2,62</b>	<b>2,64</b>	<b>3,52</b>	<b>3,42</b>

Verifica-se na Tabela 26 que os modos HOP+NIELL, HOP+VMF1, PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 apresentaram resultados similares para dias secos. Mas, o modo PNT/INPE+NIELL apresentou melhor desempenho com EMQ médio de 2,62 cm, o que representa uma melhoria de 1,1% em relação ao modelo de Hopfield. Além disso, esses resultados foram similares ao obtido pelo arquivo real.

A Figura 59 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PPP no modo cinemático. A Figura 60 representa o EMQ da componente altimétrica.

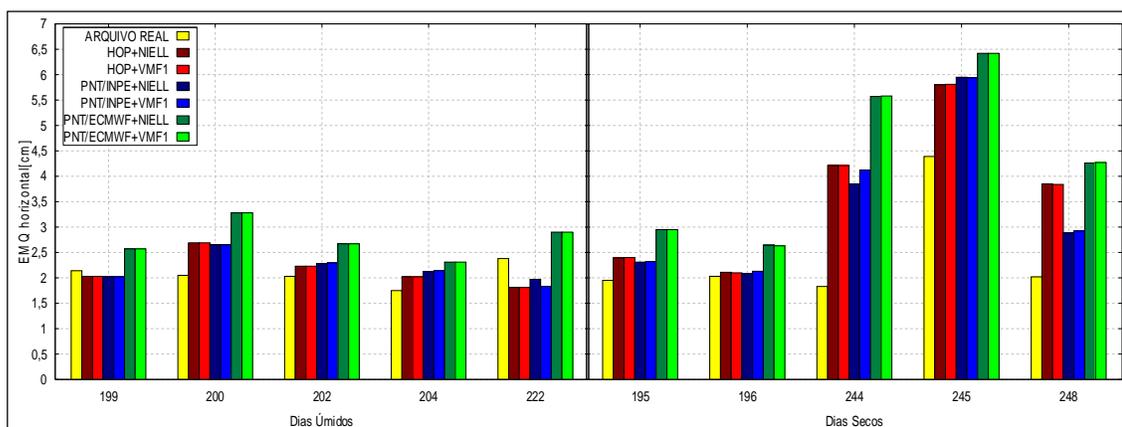


FIGURA 59 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO

De acordo com a Figura 59, na resultante planimétrica os valores de EMQ obtidos foram similares (dias úmidos). As médias do EMQ resultante para HOP+NIELL e PNT/INPE+VMF1 foram, respectivamente, 2,16 cm e 2,19 cm. O modo HOP+NIELL mostrou-se 1,4% melhor que PNT/INPE+VMF1. Já para os dias secos, é possível notar que o modo PNT/INPE+NIELL apresentou EMQ médio de

3,41 cm, para os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 de 3,67 cm. Dessa forma, o modelo PNT/INPE+NIELL foi 7,1% (uma melhoria de 0,26 cm) melhor que Hopfield.

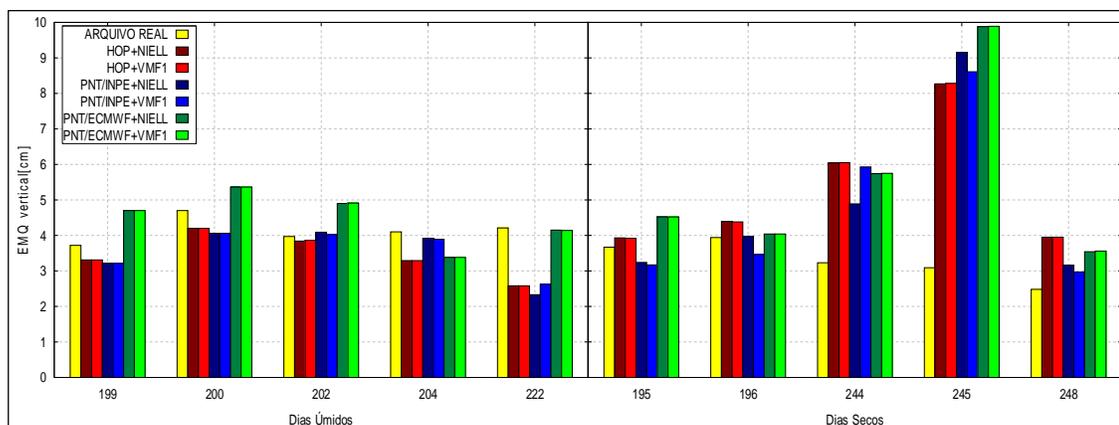


FIGURA 60 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO NA ESTAÇÃO INVERNO

Na componente vertical da Figura 60 (dias úmidos), nota-se que o modo HOP+NIELL também obteve melhores resultados para as VRS geradas. A média do EMQ foi de 3,44 cm com HOP+NIELL, em contrapartida o modo PNT/INPE+NIELL apresentou 3,52 cm na média de EMQ. Isso representa uma melhoria de 2,3% (em média 0,08 cm) com uso de HOP+NIELL ao invés de PNT/INPE+NIELL.

Em períodos secos, é possível concluir que o modo PNT/INPE+VMF1 apresentou EMQ médio de 4,83 cm, valor esse melhor que o apresentado por HOP+NIELL e HOP+VMF1 que foi de 5,32 cm. Desse modo, é possível afirmar que o modo PNT/INPE+VMF1 foi 9,2% melhor que Hopfield. A Tabela 27 mostra os valores de EMQ médio no modo cinemático para os dias úmidos.

TABELA 27 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
199	4,29	71,49	3,88	3,88	3,79	3,79	5,36	5,36
200	5,13	90,44	4,99	4,99	4,85	4,85	6,28	6,28
202	4,46	108,46	4,44	4,46	4,68	4,63	5,58	5,59
204	4,46	137,36	3,86	3,86	4,46	4,44	4,09	4,09
222	4,84	101,38	3,15	3,15	3,05	3,20	5,06	5,05
$\bar{X}$	<b>4,63</b>	<b>101,83</b>	<b>4,06</b>	<b>4,07</b>	<b>4,17</b>	<b>4,18</b>	<b>5,28</b>	<b>5,28</b>

Verificando a Tabela 27, é possível notar que o modo HOP+NIELL apresentou melhor desempenho. O EMQ obtido 4,06 neste modo mostrou-se 2,6% (em média melhoria de 0,11 cm) melhor que PNT/INPE+NIELL. Além disso, os modos HOP+NIELL, HOP+VMF1, PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 foram similares.

A Tabela 28 mostra os valores de EMQ médio no modo cinemático para os dias secos.

TABELA 28 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
195	4,16	121,83	4,60	4,60	3,98	3,93	5,40	5,40
196	4,43	63,79	4,87	4,86	4,47	4,06	4,83	4,82
244	3,71	117,73	7,36	7,37	6,22	7,22	8,00	8,01
245	5,37	80,53	10,10	10,12	11,02	10,46	11,78	11,79
248	3,20	80,97	5,52	5,51	4,28	4,17	5,54	5,56
$\bar{x}$	<b>4,17</b>	<b>92,97</b>	<b>6,49</b>	<b>6,49</b>	<b>6,00</b>	<b>5,97</b>	<b>7,11</b>	<b>7,12</b>

Observando a Tabela 28 nota-se que o EMQ para os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 foi de 6,49 cm. Por outro lado, com relação aos modelos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 o EMQ obtido foi de 6,00 cm e 5,97 cm, respectivamente. Desta maneira, é possível concluir que os modos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 foram 7,5% e 8,01% melhores que Hopfield.

#### 4.1.2.4 Estação Primavera

A Figura 61 apresenta a comparação entre os valores de EMQ da resultante planimétrica obtida com o processamento dos dados do arquivo real e das VRSs geradas. Já a Figura 62 apresenta o EMQ da componente altimétrica.

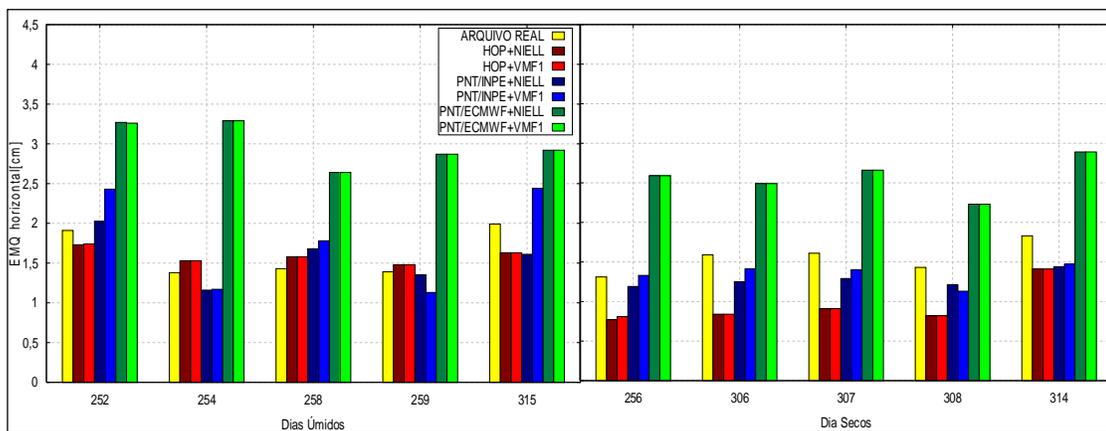


FIGURA 61 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO PRIMAVERA

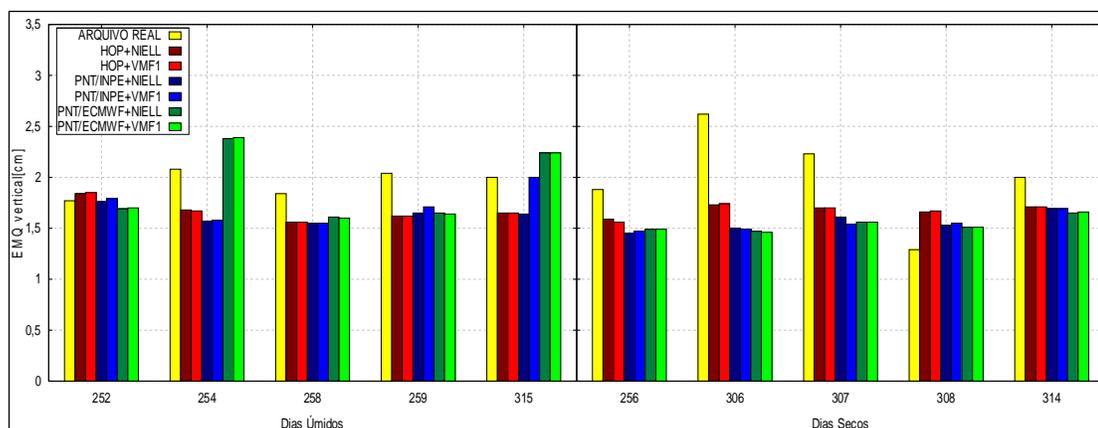


FIGURA 62 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO ESTÁTICO NA ESTAÇÃO PRIMAVERA

Analisando a Figura 61 e Figura 62 (dias úmidos), é possível notar que os melhores resultados para a VRS foram encontrados, na maioria dos casos, no modo PNT/INPE+NIELL. Observa-se que com o uso dos modelos de PNT/INPE+NIELL a média do EMQ resultante foi de 1,56 cm e 1,63 cm, para as componentes horizontal e vertical, respectivamente. Em contrapartida, com a aplicação do modelo de Hopfield a média do EMQ foi de 1,59 cm na componente horizontal e 1,67 cm para a vertical, o que caracteriza melhorias de 1,9% na componente horizontal (média de 0,03 cm de melhoria) e 2,4% para a vertical (média de 0,04 cm de melhoria).

De acordo com os dias secos na Figura 61, na componente horizontal os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 proporcionaram resultados equivalentes entre si. O EMQ obtido nesses modos foi de 0,96 cm, no entanto para o modo PNT/INPE+NIELL o EMQ obtido foi de 1,35 cm. De forma geral, isso representa uma melhoria de 28,8% com uso de HOP+NIELL e HOP+VMF1 em relação a PNT/INPE+NIELL. Já na componente vertical na Figura 62, de maneira geral

melhores valores de EMQ foram obtidos com os modos PNT/ECMWF+NIELL e PNT/ECMWF +VMF1, com EMQ médio de 1,54 cm. O modelo de Hopfield apresentou EMQ médio de 1,68 cm. Dessa forma, o modelo PNT/ECMWF foi 8,3% (melhoria de 0,14 cm) melhor que o modelo teórico de Hopfield.

A Tabela 29 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 29 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS ÚMIDOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
252	2,60	35,55	2,53	2,54	2,68	3,02	3,68	3,68
254	2,50	45,72	2,27	2,26	1,95	1,97	4,06	4,07
258	2,33	27,71	2,22	2,22	2,29	2,36	3,09	3,09
259	2,47	23,75	2,19	2,19	2,13	2,05	3,31	3,31
315	2,82	23,67	2,32	2,32	2,30	3,15	3,68	3,68
$\bar{X}$	<b>2,54</b>	<b>31,28</b>	<b>2,31</b>	<b>2,31</b>	<b>2,27</b>	<b>2,51</b>	<b>3,56</b>	<b>3,56</b>

Analisando a Tabela 29 percebe-se que os modos HOP+NIELL, HOP+VMF1 e PNT/INPE+NIELL são similares. No entanto, com a aplicação do modo PNT/INPE+NIELL o EMQ que em média era 2,31 cm passou para 2,27 cm. Isso representa uma melhoria de 1,7% (em média melhoria de 0,04 cm) com emprego de PNT/INPE+NIELL ao invés do modelo empírico de Hopfield.

A Tabela 30 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo estático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 30 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO ESTÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO PRIMAVERA (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
256	2,29	26,78	1,77	1,76	1,88	1,98	2,99	2,99
306	3,06	20,28	1,92	1,93	1,95	2,05	2,89	2,89
307	2,75	17,82	1,93	1,93	2,06	2,08	3,08	3,08
308	1,93	18,93	1,85	1,86	1,95	1,92	2,69	2,69
314	2,71	24,67	2,22	2,22	2,22	2,24	3,33	3,33
$\bar{X}$	<b>2,55</b>	<b>21,70</b>	<b>1,94</b>	<b>1,94</b>	<b>2,01</b>	<b>2,05</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>

De acordo com os dados da Tabela 30, na resultante 3D percebe-se que os modos HOP+NIELL, HOP+VMF1 e PNT/INPE+NIELL são semelhantes. No entanto, os modos HOP+NIELL e HOP+VMF1 apresentaram melhor desempenho. A melhoria com emprego de Hopfield foi de 3,5% (em média melhoria de 0,07 cm) com relação ao modelo PNT/INPE.

A Figura 63 apresenta o EMQ da resultante planimétrica no método PPP no modo cinemático. Já a Figura 64 representa o EMQ da componente altimétrica.

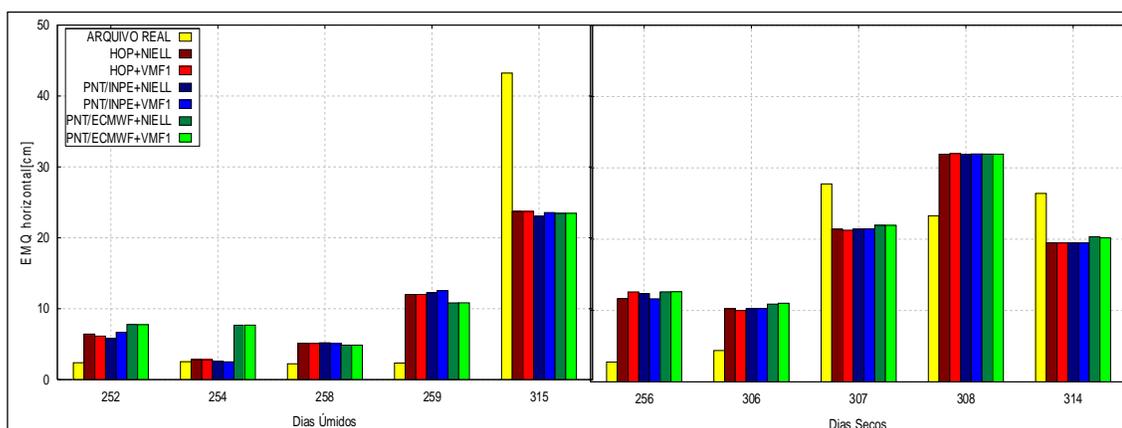


FIGURA 63 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO

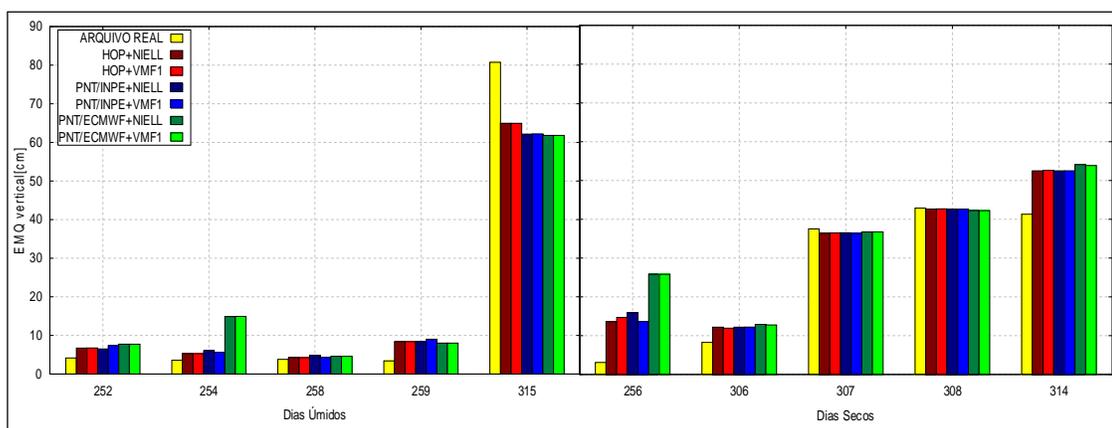


FIGURA 64 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO

Com base nos dados da Figura 63 e Figura 64 (dias úmidos) observa-se que com o uso dos modelos de PNT/INPE+NIELL a média do EMQ resultante foi de 9,84 cm e 17,56 cm, nas componentes horizontal e vertical, respectivamente. Por outro lado, com a aplicação do modelo de Hopfield a média do EMQ foi de 10,01 cm na componente horizontal e 17,92 cm para a vertical, o que caracteriza melhorias de

1,7% na componente horizontal (média de 0,17 cm de melhoria) e 2,0% para a vertical (média de 0,36 cm de melhoria).

De acordo com a Figura 63, ao analisar os dias secos é possível notar que o modo PNT/INPE+NIELL apresentou similar a Hopfield. O EMQ calculado de 18,96 cm foi similar ao EMQ obtido por HOP+NIELL que é de 18,94 cm. Em média HOP+NIELL foi 0,1% melhor que PNT/INPE+NIELL.

De acordo, com os dados da componente vertical na Figura 64 verifica-se que o modo PNT/INPE+VMF1 foi levemente melhor que o modo HOP+NIELL, com EMQ médio de 31,45 cm e 31,46 cm, respectivamente.

A Tabela 31 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo cinemático e a média para os 5 dias úmidos.

TABELA 31 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP CINEMÁTICO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
252	4,79	313,28	9,29	9,12	8,70	9,93	10,97	10,95
254	4,38	273,02	5,97	5,97	6,56	6,16	16,75	16,79
258	4,41	57,51	6,65	6,63	7,06	6,64	6,69	6,68
259	4,13	107,96	14,65	14,64	14,81	15,43	13,47	13,48
315	91,58	106,37	69,14	69,13	66,42	66,52	66,11	66,11
$\bar{x}$	<b>21,86</b>	<b>171,63</b>	<b>21,14</b>	<b>21,10</b>	<b>20,71</b>	<b>20,94</b>	<b>22,80</b>	<b>22,80</b>

Na Tabela 31 é possível notar que os modelos PNT/INPE+NIELL e PNT/INPE+VMF1 proporcionaram melhores resultados na média geral de EMQ. Os valores de EMQ para os modos foram de 20,71 cm e 20,94 cm, respectivamente. Por outro lado, com o emprego do modelo de HOP+NIELL e HOP+VMF1, os valores de EMQ foram de 21,14 e 21,10 cm. Isso representa melhorias da ordem de 2% e 0,7% (em média melhoria de 0,43 cm e 0,16 cm), respectivamente.

A Tabela 32 apresenta o EMQ da resultante 3D obtido pelo PPP no modo cinemático e a média para os 5 dias secos.

TABELA 32 – EMQ DA RESULTANTE 3D OBTIDO PELO PPP MODO CINEMÁTICO PARA DIAS SECOS NA ESTAÇÃO INVERNO (cm)

Dia	PPTE	DG	HOP +NIELL	HOP + VMF1	PNT/INPE + NIELL	PNT/INPE + VMF1	PNT/ECMWF + NIELL	PNT/ECMWF + VMF1
256	4,16	89,27	19,37	19,38	20,09	17,92	28,73	28,73
306	9,35	74,48	15,56	15,56	15,92	15,96	16,90	16,86
307	46,66	179,87	42,05	42,22	42,33	42,19	42,77	42,77
308	48,79	114,58	53,35	53,35	53,26	53,22	52,96	52,94
314	49,03	191,34	56,08	56,09	55,99	56,00	57,78	57,52
$\bar{x}$	<b>31,60</b>	<b>129,91</b>	<b>37,28</b>	<b>37,32</b>	<b>37,52</b>	<b>37,06</b>	<b>39,83</b>	<b>39,76</b>

Com base nos dados da Tabela 32, verifica-se que melhores resultados foram encontrados no modo PNT/INPE+VMF1. A melhoria encontrada com PNT/INPE+VMF1 foi de 0,6% e 0,7% (em média melhoria de 0,22 cm e 0,26 cm) para os modos de Hopfield, respectivamente.

#### 4.1.2.5 Algumas conclusões

Nesta seção, um dos principais objetivos a serem alcançados é a comparação dos modelos de Hopfield, PNT/INPE e PNT/ECMWF na geração de dados da VRS. Desde modo, os modelos foram avaliados em períodos secos e úmidos para as estações verão, outono, inverno e primavera.

A Tabela 33 sumariza os resultados de desempenho obtidos pelos modelos de PNT/INPE e PNT/ECMWF em relação ao modelo de Hopfield empregando a função de mapeamento de Niell para dias úmidos.

É possível notar que para dias úmidos o modelo de PNT/INPE foi melhor que o de Hopfield em 5 ocasiões e pior em 3 para o método PP (modo estático e cinemático). Ao comparar Hopfield com o modelo PNT/ECMWF, percebe-se que em 6 ocasiões ocorreu melhoria e piora em 2 com o método de PP. Além disso, observou-se que em comparação com Hopfield o modelo PNT/ECMWF apresentou melhor desempenho que PNT/INPE para a estação inverno. Mas, em todos os casos, a diferença é muito pequena, entre 0,01% e 2,4%. Assim, pode-se concluir que a performance de ambos os modelos foi similar para o experimento realizado.

Analisando as diferenças entre os modelos de Hopfield e PNT/INPE, notou-se que para 8 ocasiões avaliadas o modelo de Hopfield se apresentou melhor em 4 delas (estações outono e inverno). As variações para o modelo de PNT/INPE em relação a Hopfield, variaram de 0,24% a 15,47%. Já em relação ao modelo de PNT/ECMWF, o modelo de Hopfield mostrou-se melhor em 7 ocasiões observadas, neste caso as variações foram da ordem de 5,9% a 7,28%.

TABELA 33 – SUMÁRIO DO DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF EM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD PARA DIAS ÚMIDOS (NIELL)

Método de Posicionamento	Modo	Estação do Ano	HOP+NIELL→ PNT/INPE+NIELL	HOP+NIELL→ PNT/ECMWF+NIELL
PP	Estático	Verão	Melhoria de 0,57% (0,63 cm)	Piora de 0,35% (0,39 cm)
	Cinemático	Verão	Melhoria de 0,22% (0,48 cm)	Piora de 0,04% (0,09 cm)
PPP	Estático	Verão	Melhoria de 24,2% (0,59 cm)	Piora de 5,9% (0,19 cm)
	Cinemático	Verão	Melhoria de 15,47% (1,1 cm)	Melhoria de 5,5% (0,42 cm)
PP	Estático	Outono	Melhoria de 0,64% (0,7 cm)	Melhoria de 1,83% (2,02 cm)
	Cinemático	Outono	Melhoria de 0,29% (0,64 cm)	Melhoria de 0,64% (1,43 cm)
PPP	Estático	Outono	Piora de 0,24% (0,01 cm)	Piora de 6,1% (0,27 cm)
	Cinemático	Outono	Piora de 0,75% (0,04 cm)	Piora de 17,6% (1,1 cm)
PP	Estático	Inverno	Piora de 0,73% (0,61 cm)	Melhoria de 0,9% (0,74 cm)
	Cinemático	Inverno	Piora de 0,37% (0,66 cm)	Melhoria de 1,23% (2,14 cm)
PPP	Estático	Inverno	Piora de 1,27% (0,03 cm)	Piora de 30,4% (1 cm)
	Cinemático	Inverno	Piora de 2,64% (0,11 cm)	Piora de 23,11% (1,22 cm)
PP	Estático	Primavera	Melhoria de 2,4% (2,97 cm)	Melhoria de 2,1% (2,62 cm)
	Cinemático	Primavera	Piora de 0,22% (0,67 cm)	Melhoria de 0,01 % (0,02 cm)
PPP	Estático	Primavera	Melhoria de 1,76% (0,04 cm)	Piora de 35,1% (1,25 cm)
	Cinemático	Primavera	Melhoria de 2,1 % (0,4 cm)	Piora de 7,28% (1,66 cm)

Na Figura 65, é possível visualizar o desempenho médio dos modelos de PNT/INPE e PNT/ECMWF com relação ao modelo teórico de Hopfield nos métodos PP e PPP (modo estático e cinemático). Observe que quando as diferenças são positivas significa que os modelos de PNT apresentaram-se melhores que Hopfield e vice-versa.

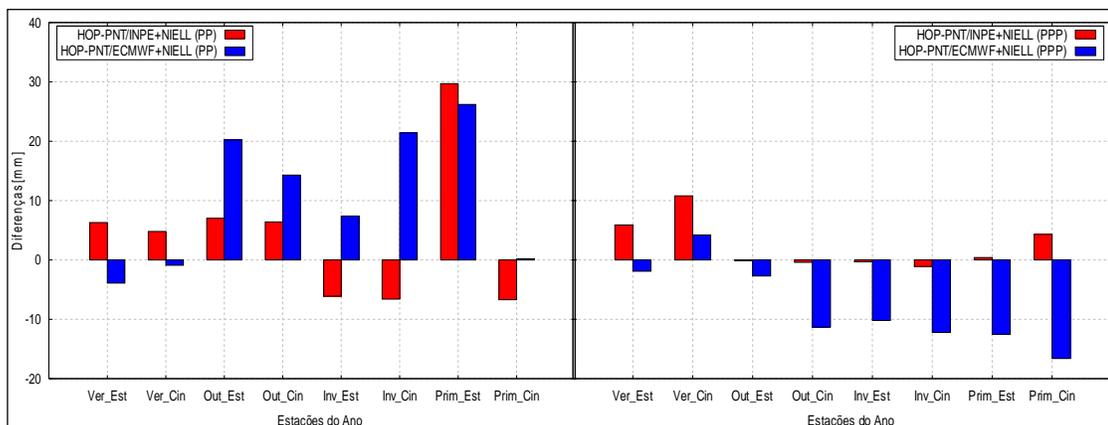


FIGURA 65 – DIFERENÇAS ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF EM DIAS ÚMIDOS

A Tabela 34 resume o progresso obtido pelo PNT/INPE e PNT/ECMWF em relação ao modelo de Hopfield.

Na Tabela 34 verificou-se que para dias secos o modelo de Hopfield foi melhor que o de PNT/INPE em 7 ocasiões e pior em 1 no método de PP (modo estático e cinemático). Já em comparação com o modelo de PNT/ECMWF, percebe-se que em 6 ocasiões ocorreu melhoria e piora em 1 com relação a Hopfield no método de PP. As diferenças encontradas para PNT/INPE foram de 0,02% e 4,87%, para o modelo de PNT/ECMWF as variações foram de 0,1% a 6,77% em relação a Hopfield.

No método de PPP o modelo de Hopfield foi melhor que o de PNT/ECMWF nas ocasiões analisadas, mas o modelo de PNT/INPE apresentou-se melhor que Hopfield em 6 das 8 ocasiões avaliadas. As variações para o modelo de PNT/INPE foram da ordem de 1,1% a 8,17% em relação a Hopfield, já para PNT/ECMWF as diferenças foram da ordem de 0,67% a 6,4% em comparação com Hopfield. Deste modo, conclui-se que ambos os modelos apresentaram resultados semelhantes no posicionamento.

TABELA 34 – DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF COM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD EM DIAS SECOS (NIELL)

Método de Posicionamento	Modo	Estação do Ano	HOP+NIELL→ PNT/INPE+NIELL	HOP+NIELL→ PNT/ECMWF+NIELL
PP	Estático	Verão	Piora de 3,7% (3,58 cm)	Piora de 3,4% (3,26 cm)
	Cinemático	Verão	Piora de 0,79% (1,97 cm)	Piora de 0,82% (2,04 cm)
PPP	Estático	Verão	Melhoria de 9,75% (0,23 cm)	Piora de 15,1 % (0,46 cm)
	Cinemático	Verão	Melhoria de 3,7% (0,3 cm)	Piora de 6,33% (0,57 cm)
PP	Estático	Outono	Piora de 0,9% (0,92 cm)	Melhoria de 0,99% (0,99 cm)
	Cinemático	Outono	Piora de 0,16% (0,31 cm)	Melhoria de 0,4% (0,78 cm)
PPP	Estático	Outono	Melhoria de 1,6% (0,07 cm)	Piora de 0,67% (0,03 cm)
	Cinemático	Outono	Melhoria de 2,16% (0,1 cm)	Piora de 16,4% (0,93 cm)
PP	Estático	Inverno	Melhoria de 4,87% (4,88 cm)	Melhoria de 6,77% (6,7 cm)
	Cinemático	Inverno	Piora de 0,02% (0,04 cm)	Melhoria de 0,28% (0,59 cm)
PPP	Estático	Inverno	Melhoria de 1,1% (0,03 cm)	Piora de 24,72% (0,87 cm)
	Cinemático	Inverno	Melhoria de 8,17% (0,49 cm)	Piora de 8,72% (0,62 cm)
PP	Estático	Primavera	Piora de 3,5% (4,75 cm)	Melhoria de 0,43% (0,57 cm)
	Cinemático	Primavera	Piora de 0,6% (2,4 cm)	Melhoria de 0,1% (0,4 cm)
PPP	Estático	Primavera	Piora de 3,5% (0,07 cm)	Piora de 35,3% (1,1 cm)
	Cinemático	Primavera	Piora de 0,64% (0,24 cm)	Piora de 6,4% (2,55 cm)

Na Figura 66, é possível visualizar o desempenho médio dos modelos em ocasiões diferentes usando a função de mapeamento de Niell. Nota-se que para os dias secos em períodos de verão o modelo de PNT/INPE apresentou-se melhor tanto para a estação de verão quanto para a estação de inverno.

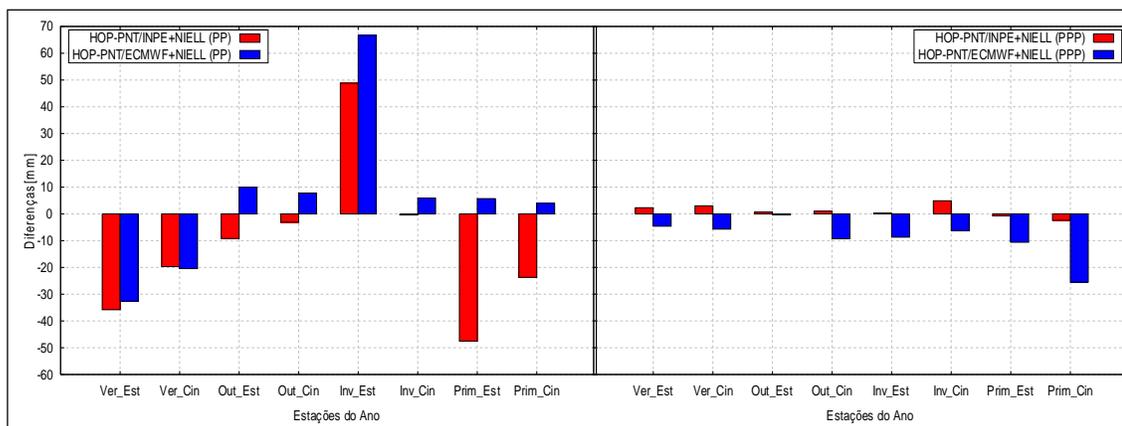


FIGURA 66 – DIFERENÇAS ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF EM DIAS SECOS

Nesta seção, testes foram realizados empregando os modelos para troposfera e a função de mapeamento VMF1 em dias úmidos. Na Tabela 35, são indicados os resultados realizados.

Analisando os dados da Tabela 35, nota-se que o modelo de PNT/INPE foi melhor do que o de Hopfield em 4 ocasiões e pior nas outras 4 para o método de PP. Esperava-se que a modelagem dinâmica apresentasse melhor desempenho, no entanto a modelagem empírica por Hopfield apresentou resultados similares. As diferenças entre PNT/INPE e Hopfield foram da ordem de 0,15% a 7,23%.

Com relação ao modelo de PNT/ECMWF as melhorias ocorreram em 6 ocasiões e pior em 2. No entanto, as diferenças encontradas foram entre 0,01% e 3%.

Observando a Tabela 35 com relação ao método de PPP, verificou-se que o modelo de PNT/INPE apresentou-se melhor em 5 ocasiões das 8 avaliadas, as discrepâncias em relação à modelagem empírica por Hopfield foram de 0,48% a 1,56%. Por outro lado ao avaliar o modelo de PNT/ECMWF em relação a Hopfield, notou-se que Hopfield foi melhor em 6 das 8 ocasiões avaliadas. As variações calculadas para PNT/ECMWF em relação a Hopfield foram de 0,35% a 7,46%.

TABELA 35 – DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF COM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD EM DIAS ÚMIDOS (VMF1)

Método de Posicionamento	Modo	Estação do Ano	HOP+NIELL→ PNT/INPE+NIELL	HOP+NIELL→ PNT/ECMWF+NIELL
PP	Estático	Verão	Melhoria de 1,56% (1,71 cm)	Piora de 0,35% (0,39 cm)
	Cinemático	Verão	Melhoria de 0,36% (0,77 cm)	Piora de 0,03% (0,1 cm)
PPP	Estático	Verão	Melhoria de 25,2% (0,61 cm)	Piora de 5,9 % (0,2 cm)
	Cinemático	Verão	Melhoria de 2,93% (0,23 cm)	Melhoria de 5,08% (0,39 cm)
PP	Estático	Outono	Piora de 1,94% (2,21 cm)	Melhoria de 3% (3,25 cm)
	Cinemático	Outono	Piora de 0,82% (1,84 cm)	Melhoria de 0,64% (1,42 cm)
PPP	Estático	Outono	Melhoria de 0,48% (0,02 cm)	Piora de 5,87% (0,26 cm)
	Cinemático	Outono	Melhoria de 1,34% (0,07 cm)	Piora de 17,5% (1,13 cm)
PP	Estático	Inverno	Piora de 1,75% (1,47 cm)	Melhoria de 0,90% (0,74cm)
	Cinemático	Inverno	Piora de 0,67% (1,18 cm)	Melhoria de 1,23% (2,14 cm)
PPP	Estático	Inverno	Piora de 2,49% (0,06 cm)	Piora de 30,06% (1 cm)
	Cinemático	Inverno	Piora de 2,63% (0,11 cm)	Piora de 22,92% (1,21 cm)
PP	Estático	Primavera	Melhoria de 7,23% (8,54 cm)	Melhoria de 2,11% (2,62 cm)
	Cinemático	Primavera	Melhoria de 0,15% (0,44 cm)	Melhoria de 0,01% (0,02 cm)
PPP	Estático	Primavera	Piora de 7,97% (0,20 cm)	Piora de 35,11% (1,25 cm)
	Cinemático	Primavera	Melhoria de 0,76% (0,16 cm)	Piora de 7,46% (1,7 cm)

A Figura 67 representa as diferenças encontradas para os modelos de PNT/INPE e PNT/ECMWF, em relação a Hopfield utilizando a VMF1. Nota-se que para o método de PP maiores variações foram obtidas no período da primavera com o modelo de PNT/INPE. Com relação ao método de PPP o modelo de PNT/INPE apresentou melhor desempenho no período de verão, mas no período de inverno o modelo empírico de Hopfield apresentou-se melhor.

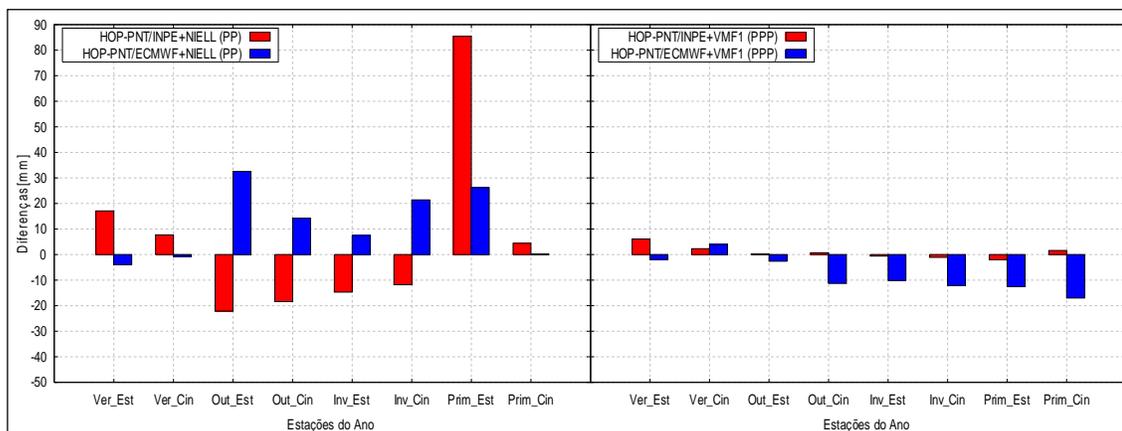


FIGURA 67 – VARIAÇÕES ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF PARA DIAS ÚMIDOS

A Figura 68 e Tabela 36 mostram as discrepâncias encontradas entre os modelos PNT/INPE e PNT/ECMWF em relação ao modelo empírico de Hopfield. Para a avaliação dos modelos troposféricos em períodos secos empregando a VMF1, verificou-se que o modelo de Hopfield foi melhor que o de PNT/INPE em todas as ocasiões avaliadas no método de PP. As variações calculadas entre PNT/INPE e Hopfield foram de 0,53% a 2,8%. Por outro lado, o modelo de PNT/ECMWF mostrou-se melhor que Hopfield em 6 das ocasiões, discrepâncias entre os modelos variaram de 0,1% a 3,4%. Assim, pode-se concluir que as discrepâncias em acurácia para os modelos foram próximas entre si.

Analisando o método de PPP nota-se que o modelo de PNT/INPE foi melhor que Hopfield em 6 ocasiões avaliadas, porém com relação ao modelo de PNT/ECMWF, Hopfield apresentou melhores resultados em 7 das 8 ocasiões observadas. As variações encontradas entre PNT/INPE e Hopfield foram da ordem de 0,38% a 8,71%. Já o modelo de PNT/ECMWF em comparação com Hopfield apresentou variações de 1,14% a 6,14%.

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que as funções de mapeamento Niell e VMF1 proporcionaram resultados similares na avaliação dos modelos troposféricos.

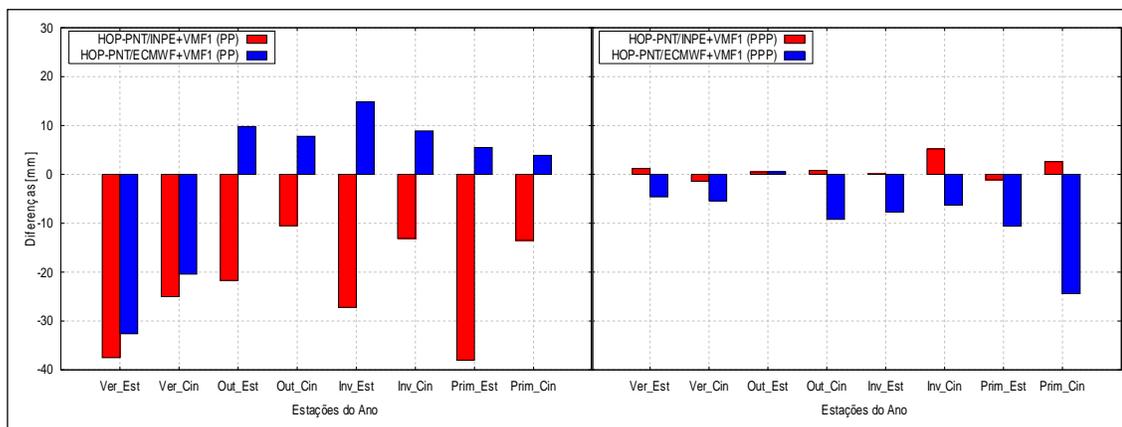


FIGURA 68 – VARIAÇÕES ENTRE O MODELO DE HOPFIELD E OS MODELOS DE PNT/INPE E PNT/ECMWF PARA DIAS SECOS

TABELA 36 – DESEMPENHO OBTIDO PELO MODELO DE PNT/INPE E PNT/ECMWF COM RELAÇÃO AO DE HOPFIELD EM DIAS SECOS (VMF1)

Método de Posicionamento	Modo	Estação do Ano	HOP+NIELL → PNT/INPE+NIELL	HOP+NIELL → PNT/ECMWF+NIELL
PP	Estático	Verão	Piora de 3,87% (3,75 cm)	Piora de 3,4% (3,26 cm)
	Cinemático	Verão	Piora de 1% (2,5 cm)	Piora de 0,82% (2,04 cm)
PPP	Estático	Verão	Melhoria de 4,86% (0,12 cm)	Piora de 15,08% (0,46 cm)
	Cinemático	Verão	Piora de 1,63% (0,14 cm)	Piora de 6% (0,54 cm)
PP	Estático	Outono	Piora de 2,1% (2,17 cm)	Melhoria de 0,98% (0,98 cm)
	Cinemático	Outono	Piora de 0,53% (1,05 cm)	Melhoria de 0,4% (0,78 cm)
PPP	Estático	Outono	Melhoria de 1,14% (0,05 cm)	Melhoria de 1,14% (0,05 cm)
	Cinemático	Outono	Melhoria de 1,72% (0,08 cm)	Piora de 16,25% (0,92 cm)
PP	Estático	Inverno	Piora de 2,65% (2,72 cm)	Melhoria de 1,5% (1,48 cm)
	Cinemático	Inverno	Piora de 0,62% (1,31 cm)	Melhoria de 1,9% (2,4 cm)
PPP	Estático	Inverno	Melhoria de 0,38% (0,01 cm)	Piora de 22,5% (0,77 cm)
	Cinemático	Inverno	Melhoria de 8,71% (0,52 cm)	Piora de 8,85% (0,63 cm)
PP	Estático	Primavera	Piora de 2,8% (3,8 cm)	Melhoria de 0,42% (0,55 cm)
	Cinemático	Primavera	Piora de 0,33% (1,35 cm)	Melhoria de 0,1% (0,39 cm)
PPP	Estático	Primavera	Piora de 5,37% (0,11 cm)	Piora de 35,33% (1,06 cm)
	Cinemático	Primavera	Melhoria de 0,7% (0,26 cm)	Piora de 6,14% (2,44 cm)

## 4.2 GERAÇÃO DA VRS COM VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA DE BASE

Nos experimentos realizados nesta seção, foram empregados dados GPS disponibilizados pelo IBGE no formato RINEX. Foram considerados nestes testes diferentes espaçamentos da estação base da rede com relação à posição da VRS, assim como a geometria formada pelas estações da referência (ver Figura 31). Nos testes realizados foram introduzidos nos dados da VRS correções para a troposfera utilizando o modelo de PNT do CPTEC/INPE (modo PNT/INPE+NIELL). Esse modelo foi adotado neste experimento, pois o mesmo apresentou melhores resultados.

Foram gerados dados de VRS na posição da estação PPTe, sendo que a VRS foi gerada em diferentes modos, entre eles o modo LB\_VRS-SPAR, o modo LB\_VRS-ROSA e o modo LB\_VRS-OURI. Com base na classificação dos modos da VRS, o modo LB\_VRS-SPAR a estação base SPAR encontrava-se a 144,09 km da posição da VRS. Para o modo LB\_VRS-ROSA a estação base ROSA encontrava-se a 165,15 km de distância da posição da VRS. Já com o modo LB\_VRS-OURI a estação base mais próxima da VRS foi a de OURI a 180,69 km de distância.

Para tanto, após a geração dos dados da VRS no software científico desenvolvido na FCT/UNESP foi realizado o processamento dos dados da VRS com o método de PPP (observáveis L1, C1, L2, P2) e PP (observável C1), seguindo a metodologia descrita na seção 3.5.

### 4.2.1 Processamento da VRS no Método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

A Figura 69 refere-se ao EMQ obtido para a resultante planimétrica com o método PPP para os dias amostrais. O EMQ vertical encontra-se representado na Figura 70 e a Tabela 37 representa o EMQ da componente 3D.

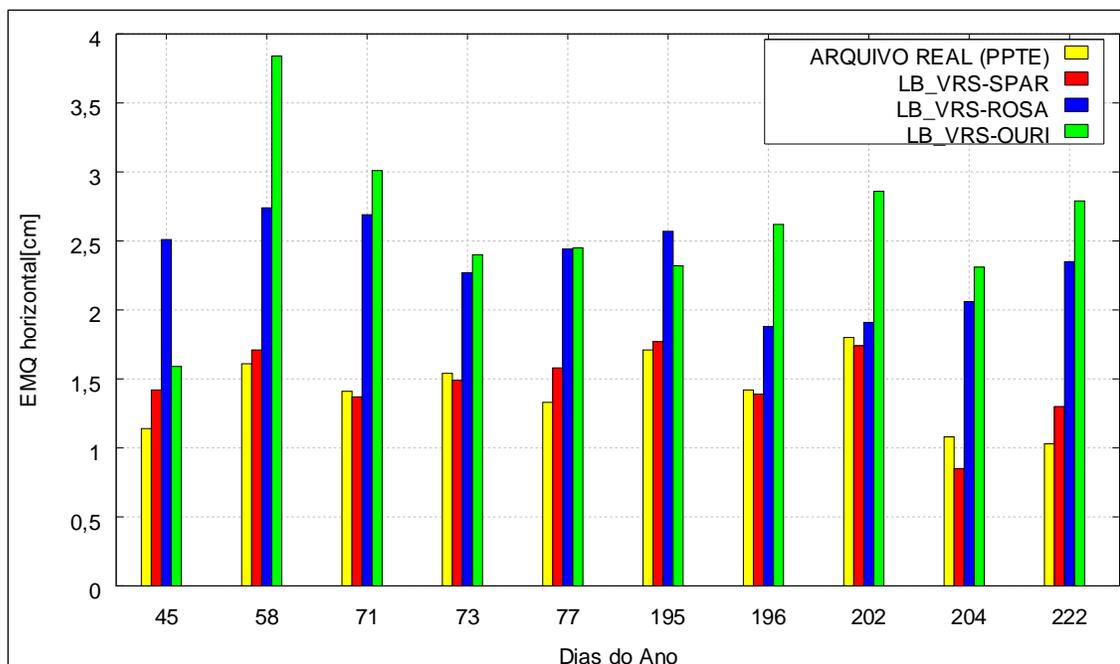


FIGURA 69 – CÁLCULO DO EMQ PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP MODO ESTÁTICO

Com base nos dados da Figura 69, é possível notar que a média dos EMQ obtidos para a componente planimétrica foi similar ao EMQ para o arquivo real (1,41 cm para o arquivo real e 1,46 cm para o modo LB\_VRS-SPAR). Além disso, o modo LB\_VRS-SPAR apresentou melhores resultados que o modo LB\_VRS-ROSA. O EMQ calculado para o LB\_VRS-ROSA foi de 2,34 cm. Isso significa uma melhoria de 37,6% (em média melhoria de 0,88 cm) quando a linha de base varia de 165,15 km para 144,09 km (variação de 21,06 km). De acordo com o EMQ de 2,62 cm adquirido no modo LB\_VRS-OURI, pode-se afirmar que a melhoria alcançada foi de 44,3% (em média melhoria de 1,16 cm) para linhas de base que variam de 180,69 km para 144,09 km (variação de 36,6 km).

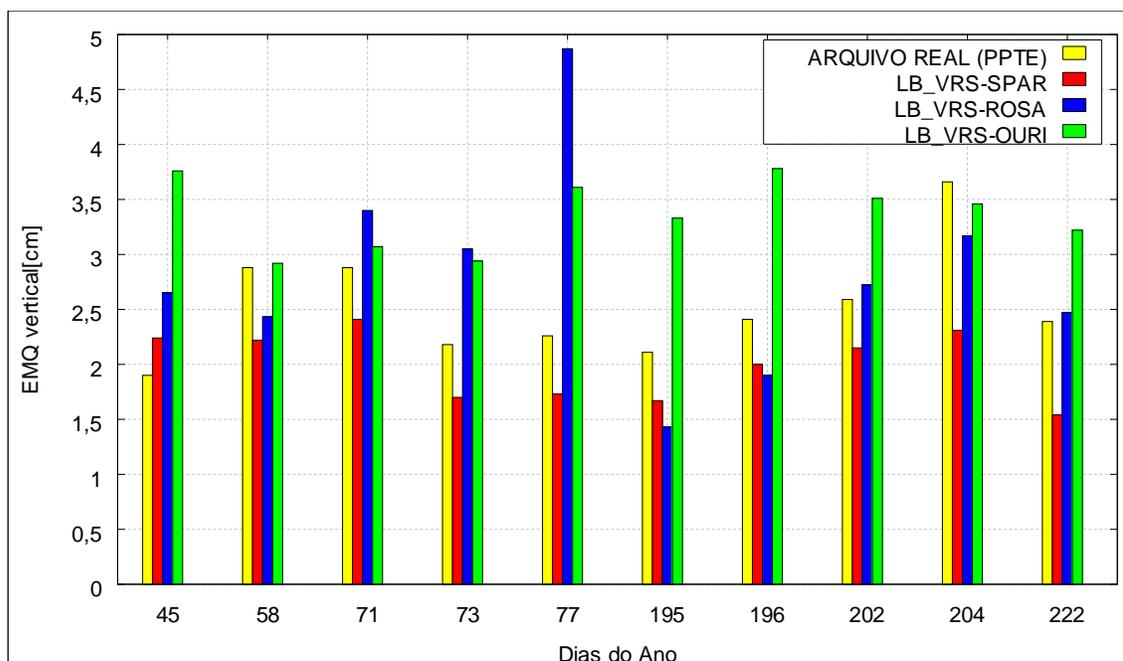


FIGURA 70 – CÁLCULO DO EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP MODO ESTÁTICO

De acordo com a Figura 70, observa-se que o modo LB\_VRS-SPAR apresentou melhor resultado que o EMQ médio do arquivo real (2 cm para o modo LB\_VRS-SPAR e 2,53 cm para o arquivo real (PPTTE)). Verifica-se que de forma geral, o modo LB\_VRS-SPAR apresentou melhor desempenho para a componente vertical no PPP estático, visto que o valor médio do EMQ obtido com modo LB\_VRS-ROSA foi de 2,81 cm. No modo LB\_VRS-SPAR a melhoria foi de 28,8% (em média 0,81 cm de melhoria) sobre o modo LB\_VRS-ROSA. Para o modo LB\_VRS-OURI o EMQ obtido foi de 3,36 cm, o que representa uma melhoria de 40,4% com uso de dados de LB\_VRS-SPAR ao invés de LB\_VRS-OURI. A Tabela 37 apresenta o EMQ da resultante 3D.

TABELA 37 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PPP MODO ESTÁTICO (CM)

<b>Dia</b>	<b>ARQ. REAL (PSTE)</b>	<b>LB_VRS-SPAR</b>	<b>LB_VRS-ROSA</b>	<b>LB_VRS-OURI</b>
45	2,21	2,65	3,65	4,08
58	3,30	2,81	3,66	4,82
71	3,21	2,77	4,34	4,30
73	2,67	2,26	3,81	3,79
77	2,63	2,34	5,44	4,37
195	2,72	2,44	2,94	4,06
196	2,80	2,44	2,68	4,60
202	3,16	2,76	3,32	4,53
204	3,82	2,46	3,78	4,16
222	2,60	2,02	3,41	4,26
$\bar{x}$	<b>2,91</b>	<b>2,50</b>	<b>3,70</b>	<b>4,30</b>

Conforme pode ser visto na Tabela 37, menores valores de EMQ foram obtidos com o modo LB\_VRS-SPAR. O EMQ calculado para o arquivo real foi de 2,91 cm, mas com LB\_VRS-SPAR o EMQ foi de 2,50 cm (melhoria de 0,41 cm). Para a componente 3D, nota-se que com o modo LB\_VRS-ROSA o EMQ foi de 3,7 cm, o que representa uma degradação de 32,4% caso uma estação da rede venha falhar. No modo LB\_VRS-OURI a discrepância em acurácia foi ainda maior com EMQ médio de 4,30 cm, isso significa uma redução de 41,9% (em média 1,8 cm) caso 2 estações sofram falhas. A conclusão que se tira é que com a variação dos comprimentos da linha de base interfere significativamente na qualidade dos dados da VRS.

A Figura 71 refere-se ao EMQ obtido para a resultante planimétrica com o método PPP no modo cinemático. O EMQ vertical no modo cinemático pode ser visualizado na Figura 72.

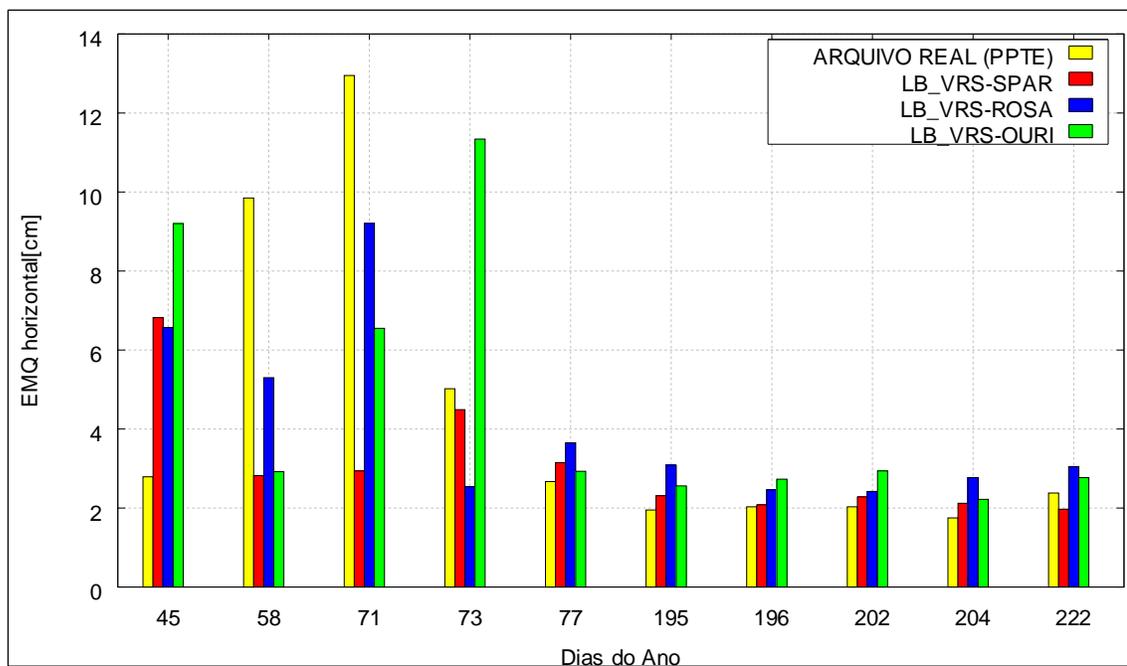


FIGURA 71 – CÁLCULO DO EMQ PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PPP NO MODO CINEMÁTICO

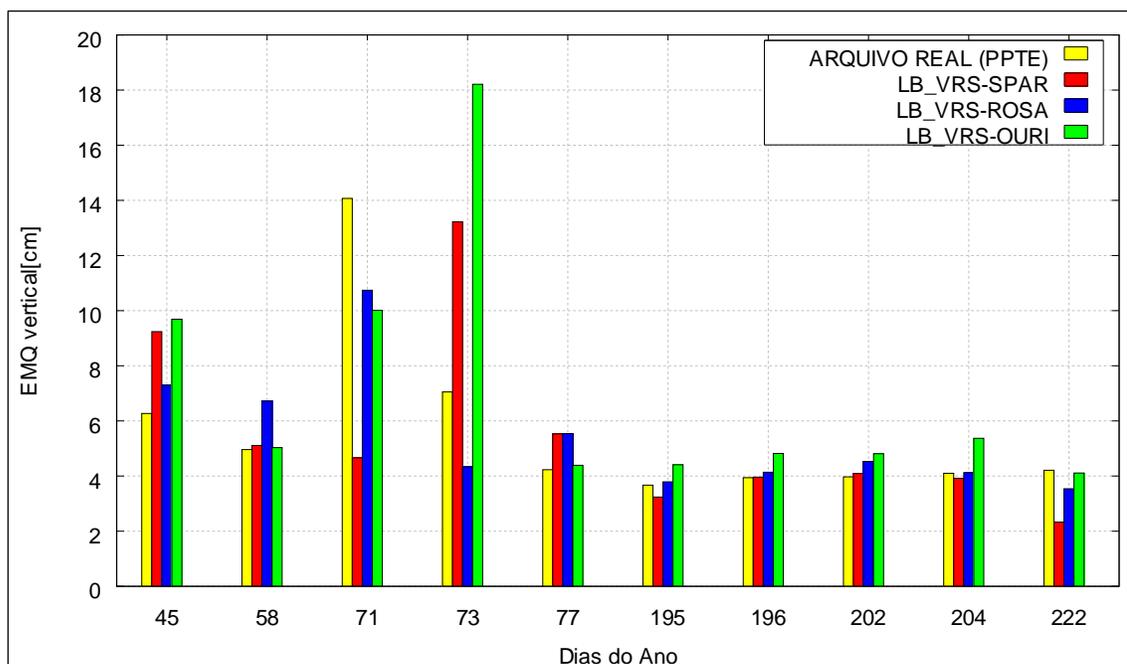


FIGURA 72 – CÁLCULO DO EMQ DA COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PPP MODO CINEMÁTICO

Com base nos dados da Figura 71, verifica-se que o modo LB\_VRS-SPAR apresentou desempenho satisfatório em linhas de base mais próxima (144,09 km). Em relação ao modo LB\_VRS-ROSA (linha de base de 165,15 km) o EMQ médio obtido foi de 4,10 cm, enquanto com LB\_VRS-SPAR o EMQ foi de 3,61 cm. De forma que a melhoria obtida foi de 11,9% no modo LB\_VRS-SPAR. Já para o modo

LB\_VRS-OURI o EMQ médio obtido foi de 4,62 cm, o que representa uma degradação de 21,9% (em média redução de 1,01 cm) quando a distância à estação base aumenta de 144,09 km para 180,69 km.

Analisando a Figura 72 nota-se que melhores resultados foram obtidos com o modo LB\_VRS-ROSA. O EMQ que em média era 5,65 cm para o arquivo real (PPTe) passou para 5,47 cm no modo LB\_VRS-ROSA melhoria de 3,25% (em média melhoria de 0,18 cm). O modo LB\_VRS-SPAR apresentou EMQ médio de 5,53 cm, com 1,1% de diferença em relação ao modo LB\_VRS-ROSA. Para o modo LB\_VRS-OURI o EMQ foi de 7,09 cm, esse valor representa uma degradação de 22,8% (redução em média 1,6 cm) com relação ao modo LB\_VRS-ROSA. A Tabela 38 apresenta o EMQ da resultante 3D para o método PPP modo cinemático.

TABELA 38 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PPP MODO CINEMÁTICO (CM)

<b>Dia</b>	<b>ARQ. REAL (PPTe)</b>	<b>LB_VRS-SPAR</b>	<b>LB_VRS-ROSA</b>	<b>LB_VRS-OURI</b>
45	6,86	11,48	9,81	13,36
58	11,03	5,84	8,55	5,82
71	19,12	5,51	14,14	11,97
73	8,66	13,96	5,02	21,45
77	5,00	6,36	6,63	5,28
195	4,16	3,98	4,89	5,10
196	4,43	4,47	4,82	5,54
202	4,46	4,68	5,14	5,64
204	4,46	4,46	4,96	5,81
222	4,84	3,05	4,67	4,96
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>7,30</b>	<b>6,38</b>	<b>6,86</b>	<b>8,49</b>

Analisando a Tabela 38 percebe-se que, o modo LB\_VRS-SPAR apresentou, de forma geral, melhores resultados para a resultante 3D no método PPP cinemático. O EMQ em média foi de 6,38 cm, sendo que para o modo LB\_VRS-ROSA o EMQ foi de 6,86 cm. Esses valores mostram que com a variação da linha de base de 144,09 km para 165,15 km a acurácia no posicionamento ficou 7% degradada (em média 0,48 cm). Observando os dados do modo LB\_VRS-OURI, nota-se que o EMQ médio foi de 8,49 cm. Isso significa que em média houve

redução de 19,1% (em média 1,63 cm) caso a linha de base varie de 165,15 km para 180,69 km. Conclui-se que com a mudança de geometria a acurácia sofreu degradação em torno de 2 cm. Mas, dependendo da finalidade do posicionamento os resultados podem ser aceitáveis.

#### 4.2.2 Processamento da VRS no Método de Posicionamento por Ponto (PP)

Da mesma forma que na seção 4.2.1.1, nessa seção são apresentados os resultados do posicionamento por ponto entre a VRS e a estação real. No PP a única observável empregada é a pseudodistância na portadora L1 (C1), o que torna o PP menos preciso que o PPP. A Figura 73 apresenta o EMQ da resultante planimétrica e a Figura 74 a componente vertical obtida pela VRS e o arquivo real. Já a Tabela 39 traz os valores do EMQ 3D.

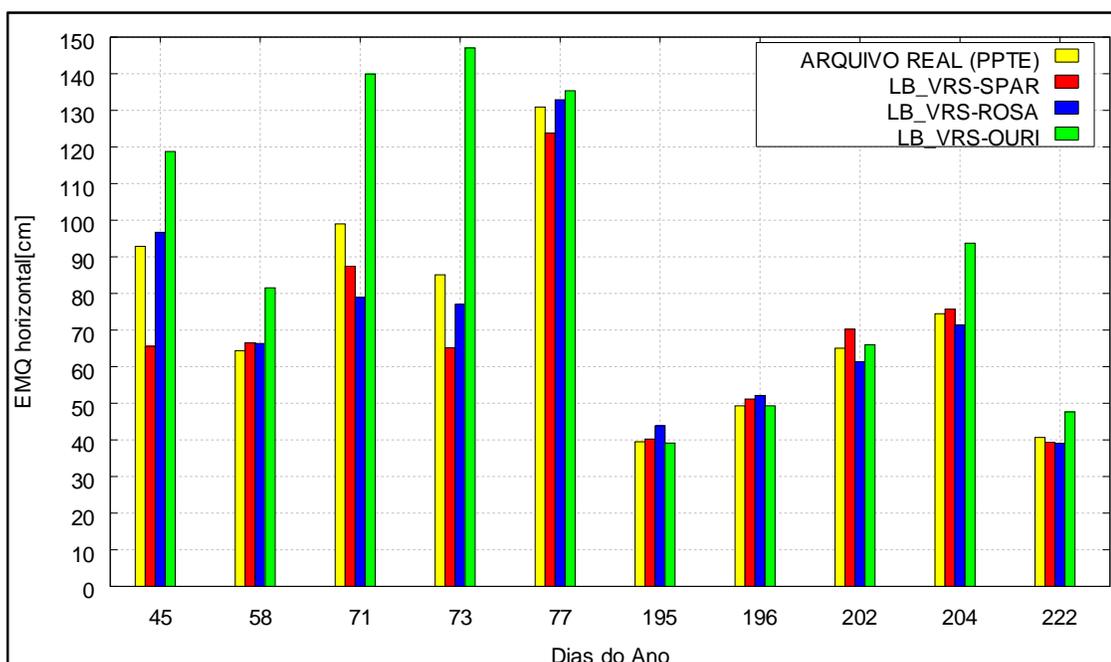


FIGURA 73 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO

Conforme a Figura 73 é possível notar que, com relação à componente planimétrica, o menor EMQ médio calculado foi de 68,5 cm para o modo LB\_VRS-SPAR. Por outro lado, com o modo LB\_VRS-ROSA o EMQ médio foi de 71,96 cm. Verifica-se no método PP, que menor distância da estação base entre 144,09 km e

165,15 km o EMQ sofreu piora de 12,7% (em média redução de 21,06 cm). Para o modo LB\_VRS-OURI é possível observar que o EMQ calculado foi de 91,84 cm, o que significa uma redução de 21,6% (em média redução de 19,9 cm) em comparação com o modo LB\_VRS-ROSA. Além do mais, a distância da estação base está variando de 165,15 km para 180,69 km.

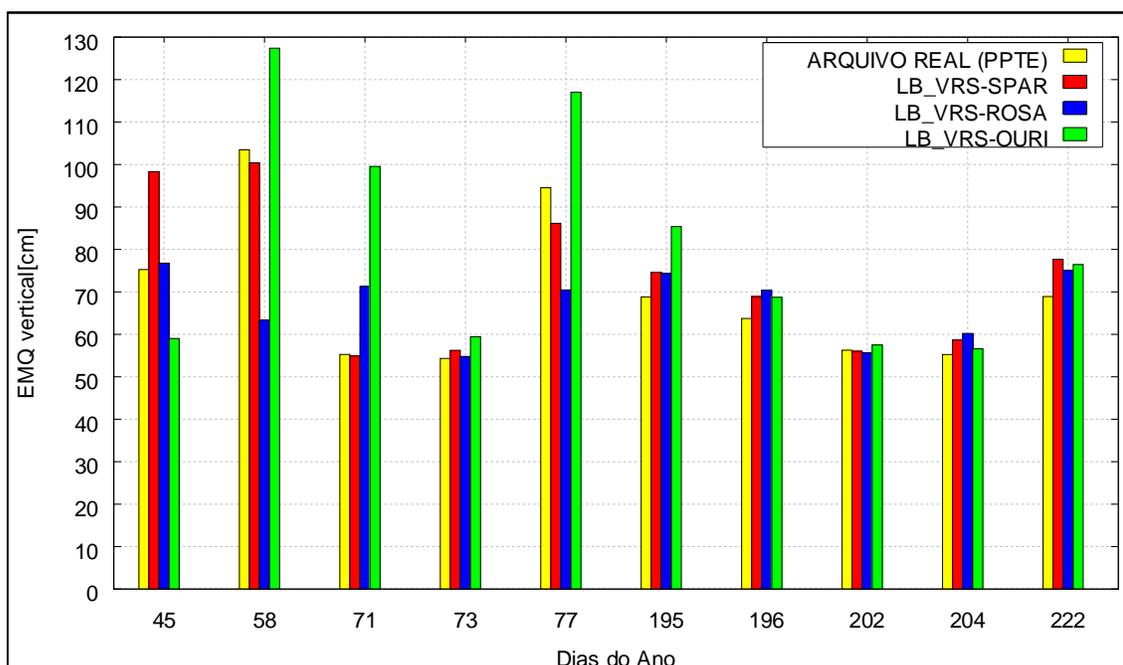


FIGURA 74 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO ESTÁTICO

De acordo com a Figura 74, na componente vertical os melhores valores de EMQ foram obtidos com o modo LB\_VRS-ROSA. O EMQ no modo LB\_VRS-SPAR foi em média de 73,18 cm, mas com o modo LB\_VRS-ROSA o EMQ adquirido foi de 67,22 cm. Deste modo, a melhoria obtida com o modo LB\_VRS-ROSA foi de 8,1% (em média 5,96 cm de melhoria). Para o modo LB\_VRS-OURI verificou-se que o EMQ médio foi de 80,71 cm, isso representa uma redução de 16,7% (em média 13,5 cm) em relação ao modo LB\_VRS-ROSA.

A Tabela 39 apresenta o EMQ da resultante 3D para o método PP modo estático.

TABELA 39 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PP MODO ESTÁTICO (CM)

<b>Dia</b>	<b>ARQ. REAL (PSTE)</b>	<b>LB_VRS-SPAR</b>	<b>LB_VRS-ROSA</b>	<b>LB_VRS-OURI</b>
45	119,53	118,17	123,47	132,63
58	121,85	120,42	91,74	151,26
71	113,37	103,21	106,29	171,69
73	100,96	86,07	94,51	158,59
77	161,48	150,83	150,42	178,94
195	79,34	84,74	86,27	93,93
196	80,57	85,78	87,58	84,59
202	85,97	89,80	82,83	87,52
204	92,73	95,76	93,42	109,48
222	80,01	87,06	84,58	90,06
$\bar{x}$	<b>103,58</b>	<b>102,18</b>	<b>100,11</b>	<b>125,87</b>

Na Tabela 39 é dado o EMQ obtido no modo estático para a resultante 3D. Conforme a análise dos dados foi possível concluir que o modo LB\_VRS-ROSA apresentou melhor desempenho para linha de base de 165,15 km. O EMQ obtido de 100,11cm apresentou melhoria de 2% (em média melhoria de 2,1 cm) em relação ao modo LB\_VRS-SPAR. Já com relação ao modo LB\_VRS-OURI o EMQ médio foi de 125,87 cm, de forma geral nota-se uma redução de 20,5% (em média 25,8 cm) quando a linha de base varia de 165,15 km para 180,69 km.

As Figuras 75 e 76 apresentam o EMQ da resultante planimétrica e componente altimétrica para o PP no modo cinemático, respectivamente.

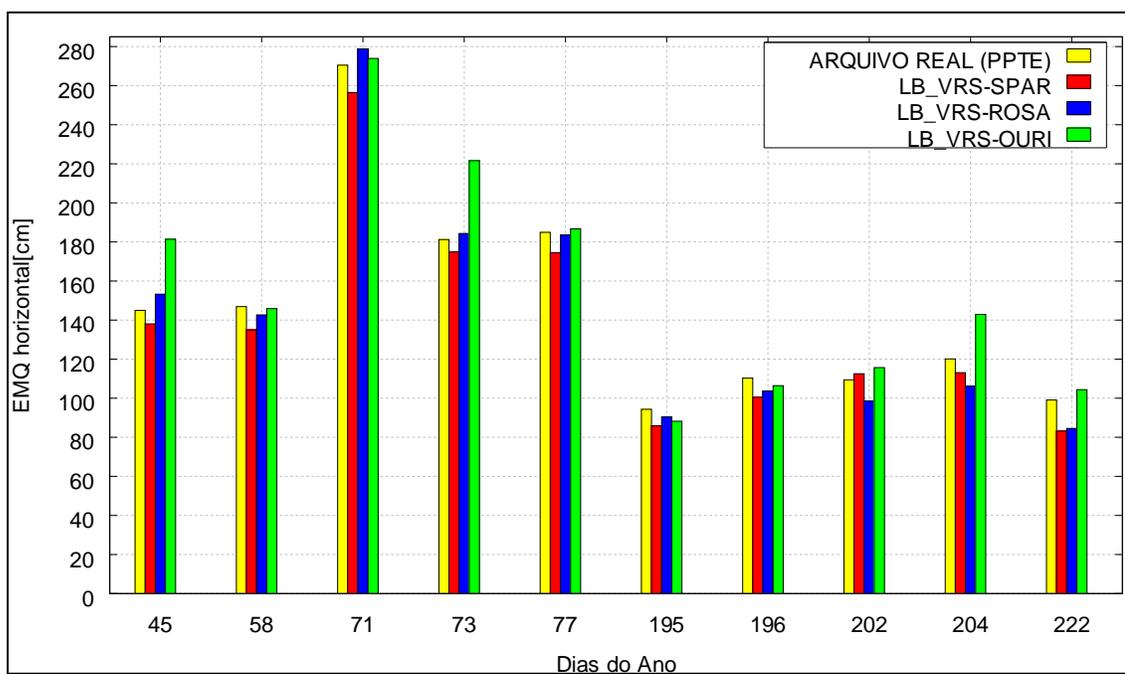


FIGURA 75 – EMQ OBTIDO PARA A RESULTANTE PLANIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO

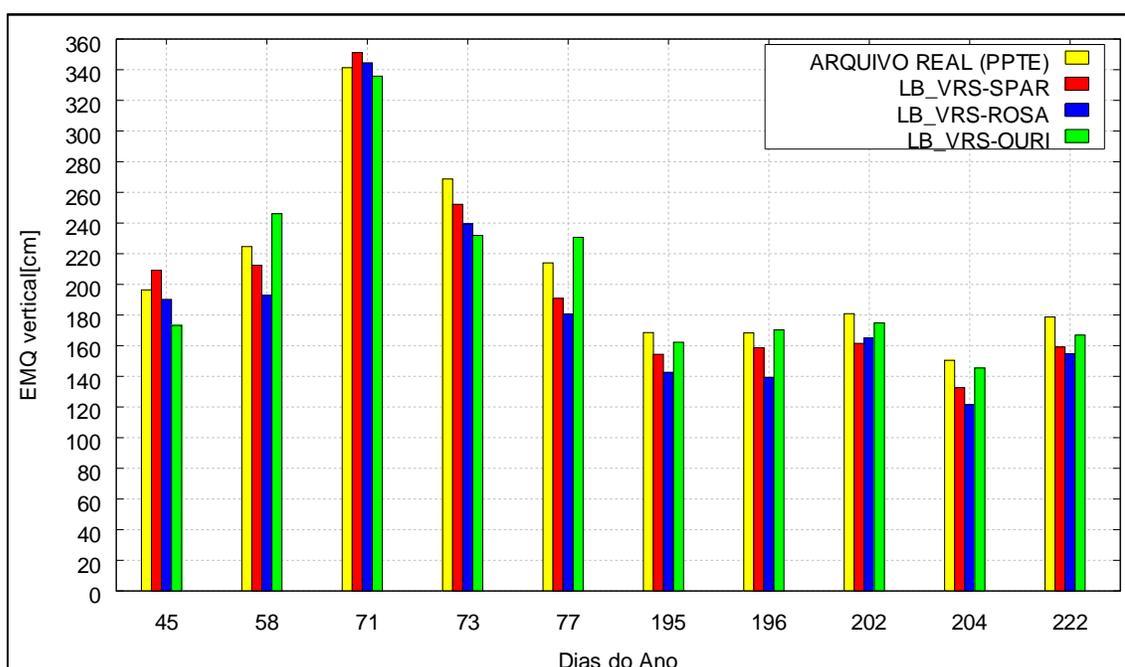


FIGURA 76 – EMQ OBTIDO PARA A COMPONENTE ALTIMÉTRICA COM O PP NO MODO CINEMÁTICO

Na Figura 75 é dado o EMQ obtido no Modo Cinemático para a resultante planimétrica. Note que, como esperado, todos os EMQ calculados foram maiores em comparação ao Modo Estático. Com relação à componente horizontal melhores

valores de EMQ foram obtidos para o modo LB\_VRS-SPAR que em foi de 137,40 cm, por outro lado com emprego do modo LB\_VRS-ROSA o EMQ médio foi de 142,58 cm, o que representa uma redução de 3,6% (em média redução de 5,2 cm). Por fim, no modo LB\_VRS-OURI o EMQ médio foi de 156,70 cm, o que implica em redução de 9% em acurácia (em média redução de 14,1 cm).

De acordo com a Figura 76, na componente altimétrica o valor de EMQ obtidos para o modo LB\_VRS-ROSA apresentou melhor acurácia. A média do EMQ resultante para LB\_VRS-SPAR foi em média 198,2 cm, em contrapartida o modo LB\_VRS-ROSA apresentou EMQ de 187,07 cm. Deste modo, a redução foi de 5,6% (em média de 11,13 cm) com a mudança das linhas de base de 144,09 km para 165,15 km. Em relação ao modo LB\_VRS-OURI a degradação em acurácia foi de 8,2% (em média 16,68 cm) em comparação com o modo LB\_VRS-ROSA. A Tabela 40 apresenta o EMQ da resultante 3D no modo cinemático.

TABELA 40 – EMQ DA RESULTANTE 3D NO PP MODO CINEMÁTICO (CM)

Dia	ARQ. REAL (PTE)	LB_VRS-SPAR	LB_VRS-ROSA	LB_VRS-OURI
45	244,12	250,58	244,27	250,79
58	268,42	251,66	239,80	286,07
71	435,51	434,86	443,21	433,37
73	324,11	306,93	302,03	320,77
77	282,84	258,61	257,57	296,75
195	193,15	176,63	168,84	184,68
196	201,23	187,81	173,69	200,85
202	211,41	196,83	192,17	209,67
204	192,49	174,23	161,25	203,86
222	204,35	179,55	176,37	196,86
$\bar{X}$	<b>255,76</b>	<b>241,77</b>	<b>235,92</b>	<b>258,37</b>

Observando a Tabela 40 pode-se perceber que melhores valores de EMQ foram obtidos com o modo LB\_VRS-ROSA. O EMQ médio foi de 235,92 cm neste modo. Era esperado que o modo LB\_VRS-SPAR apresentasse melhores resultados de EMQ, visto que a linha de base é de 144,09 km. Porém o EMQ obtido foi de 241,77 cm, o que significa uma redução 2,4% em acurácia (em média 5,9 cm). Para

o modo LB\_VRS-OURI com linha de base de 180,69 km o EMQ adquirido foi de 258,37 cm, o que representa uma redução em acurácia de 8,7% em relação ao modo LB\_VRS-ROSA.

#### 4.2.3 Algumas conclusões

Essa seção teve como objetivos principais analisar a qualidade da posição da VRS, conforme a variação na distância entre linhas de base entre a estação base da rede e a posição da VRS.

Para auxiliar na análise da variação das distâncias, a Tabela 41 apresenta um sumário dos resultados.

TABELA 41 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES LINHAS DE BASE (CM)

Método de Posicionamento	Modo	VRS→SPAR	VRS→ROSA (D = 165,15 km)	VRS→OURI (D = 180,69 km)
PPP	Estático	D=144,09 km	Melhoria de 32,4% (1,2 cm)	Melhoria de 41,9% (1,8 cm)
	Cinemático	D=144,09 km	Melhoria de 7% (0,48 cm)	Melhoria de 24,8% (2,1 cm)
PP	Estático	D=144,09 km	Piora de 2% (2,1 cm)	Melhoria de 18,8% (23,7 cm)
	Cinemático	D=144,09 km	Piora de 2,5% (5,85 cm)	Melhoria de 6,4% (16,6 cm)

A Figura 77 refere-se às discrepâncias ao fixar uma linha de base de 144,09 km, considerada curta (LB\_VRS-SPAR) em comparação com as linhas de base de 165,15 km (LB\_VRS-ROSA) e 180,69 km (LB\_VRS-OURI), respectivamente. Neste experimento também foi analisado as diferenças de altitude entre as estações PPTe, SPAR, ROSA e OURI, foram encontradas diferenças em torno de 20 m. Deste modo, foi possível constatar que a variação de altitude provavelmente não teve influência sobre o atraso troposférico.

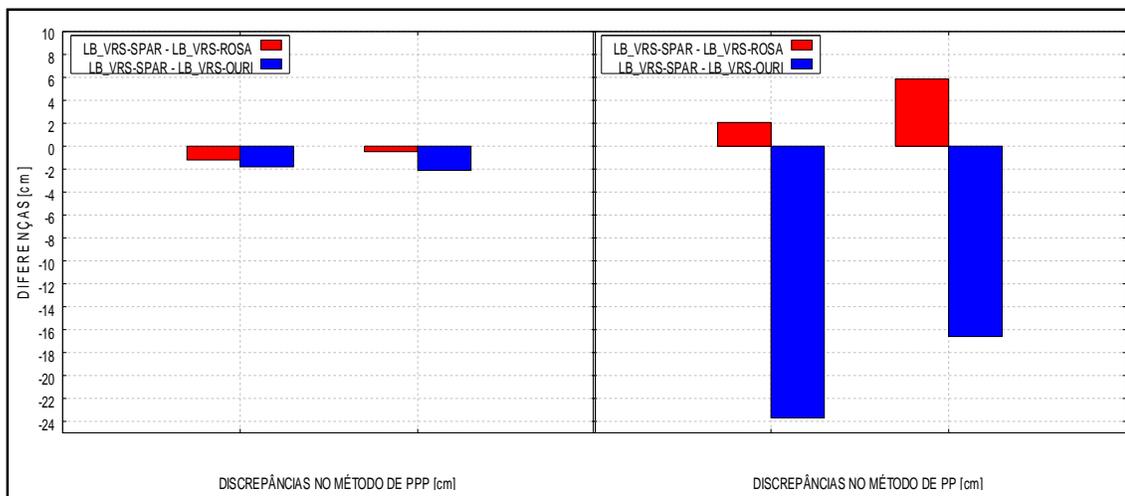


FIGURA 77 – DIFERENÇAS DE EMQ COM VARIAÇÃO DA LINHA BASE

Na Tabela 41 e Figura 76 nota-se que a linha de base de 144,09 km foi melhor que linhas de base de 165,15 km em 2 ocasiões e pior em 2. Com relação às linhas de base de 180,69 km, a linha de base de 144,09 km mostrou-se melhor em todas as ocasiões. Portanto, quanto mais próxima a estação base da rede se encontrar da posição da VRS, melhores resultados em acurácia podem ser obtidos.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo central dessa dissertação de avaliar os modelos globais e regionais para troposfera no posicionamento GPS foi efetivado mediante testes em dias amostrais compreendendo períodos secos e úmidos nas quatro estações do ano. Como contribuição deste trabalho, o modelo global do ECMWF e a função de mapeamento VMF1 foram avaliados sobre as coordenadas da VRS. Os modelos PNT/INPE e Hopfield também foram avaliados de forma mais rigorosa, outros experimentos iniciais podem ser vistos em Alves (2008) e também em (ALVES e MONICO, 2011). Além disso, avaliou-se a qualidade dos dados da VRS ao modificar progressivamente o comprimento da linha de base entre a posição da VRS e a estação base da rede. Dos resultados apresentados cabe enfatizar alguns aspectos importantes, conforme abordado a seguir.

### 5.1 CONCLUSÕES

Os experimentos desta pesquisa foram conduzidos em dois momentos distintos, o primeiro com a finalidade de analisar a qualidade da VRS no posicionamento GPS a partir da comparação de diferentes modelos para troposfera. Posteriormente, o segundo com objetivo de avaliar a qualidade dos dados de VRS para diferentes linhas de base entre a estação base da rede e a posição da VRS.

Além disso, foi aplicada uma metodologia diferenciada desenvolvida por Alves (2008), que consiste em gerar dados de uma estação de referência virtual sem solucionar o vetor das ambiguidades entre as estações da rede, empregando apenas a correção com modelos para atmosfera. A aplicação dessa metodologia propiciou resultados com acuracidade satisfatória para diversas aplicações, como por exemplo, posicionamento em locais com obstáculos naturais (por exemplo, árvores e terrenos montanhosos), navegação terrestre, agricultura de precisão e aplicação em georreferenciamento de imóveis rurais.

O método de posicionamento empregado na análise dos dados das VRSs geradas foi o absoluto, subdividido em PP e PPP. O primeiro emprega observações de código, enquanto o segundo utiliza observações de fase e código.

No primeiro experimento, melhores valores de acurácia foram obtidos com o PPP. Nos testes realizados em períodos úmidos e secos, a correção para o atraso inclinado foi obtida pelo produto entre os modelos para troposfera e as funções de mapeamento de Niell e VMF1.

Os melhores resultados do posicionamento absoluto foram obtidos com o método de PPP. Os experimentos com modelo de PNT/ECMWF e a função de mapeamento de Niell mostraram melhor desempenho em relação a Hopfield no PP, as melhorias alcançadas variaram de 0,01% a 2,1% na resultante 3D em períodos úmidos. Com o modelo de PNT/INPE as variações em relação ao modelo empírico de Hopfield foram menores no método de PPP, mostrando-se superiores a 0,24% e inferiores a 13,4%.

Nos testes realizados em períodos secos, notou-se que para o método de PP o modelo PNT/ECMWF apresentou melhor desempenho que o modelo de PNT/INPE em 6 ocasiões. As variações em relação modelo de Hopfield foram inferiores a 6,77%, conforme a Figura 65. No método de PPP, o modelo de PNT/INPE mostrou-se melhor. O desempenho em relação a Hopfield foi inferior a 8,17%.

Para os experimentos com os modelos e a função de mapeamento VMF1 em dias úmidos, o modelo de PNT/ECMWF apresentou melhores resultados em 6 ocasiões no método de PP. Mas, deve-se levar em consideração que o modelo de Hopfield mostrou-se eficiente em 2 ocasiões, além de apresentar baixo custo computacional e simples implementação.

Na resultante 3D as melhorias calculadas foram inferiores a 3% em relação ao modelo de Hopfield. Já para o método de PPP a variações encontradas para o modelo PNT/INPE foram inferiores a 25,2% para resultante 3D.

Analisando os modelos troposféricos em períodos secos, verificou-se que para o método de PP o modelo de PNT/ECMWF foi melhor em relação a Hopfield em 6 ocasiões, conforme a Figura 67. Nota-se que as variações foram inferiores 1,5% e superiores a 0,1%. No método de PPP, o modelo de PNT/INPE foi mais vigoroso que Hopfield, melhorias inferiores a 8,71% foram obtidas.

A partir de testes realizados, constatou-se que tanto com o PP quanto para o PPP, os resultados encontrados foram promissores, o que proporcionou

confiabilidade na metodologia aplicada. A conclusão final que se tira, é que ambas as funções de mapeamento proporcionaram resultados similares para os modelos troposféricos aplicados no posicionamento em redes de estações de referência. Mas, observou-se que o custo computacional ao aplicar correções com a VMF1 é superior em relação à função de Niell. Assim, em termos de produtividade é mais vantajoso empregar a função de Niell que a VMF1 na determinação do atraso troposférico inclinado.

Assim, pode-se concluir que com os testes realizados os objetivos específicos foram alcançados, de modo que melhores valores de EMQ foram obtidos em períodos secos. No entanto, em períodos úmidos valores de EMQ também foram satisfatórios, a diferença entre os modelos de PNT e Hopfield foi muito pequena no PPP, variações de no máximo 15,47% foram obtidas. Para o método de PP, em média diferenças inferiores a 7,23% foram atingidas.

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que com o uso de dados de redes de estação de referência os resultados obtidos no método de PPP apresentaram acurácia centimétrica, enquanto os dados no método de PP acurácia métrica. Deste modo, foi possível avaliar que dentre os diferentes modelos para correção do atraso troposférico, o modelo de PNT/INPE apresentou melhor desempenho, juntamente com a função de mapeamento de Niell.

Já em relação ao segundo experimento, melhores resultados em acurácia foram encontrados para linha de base curta entre a estação base da rede e a posição da VRS. No método PPP variações menores que 2,1 cm foram obtidas para linhas de base que variam de 144,09 km a 180,69 km na geração de dados da VRS.

Analisando a mesma variação para linhas de base no método de PP, notou-se que as variações de EMQ foram inferiores a 23,7 cm. Desta maneira, verificou-se quanto menor a distância entre a estação base da rede e a posição da VRS, melhores resultados em acurácia podem ser atingidos.

## 5.2 ALGUMAS RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados alcançados e análises realizadas é possíveis estabelecer as seguintes recomendações:

- ✓ Recomenda-se que em aplicações utilizando os modelos, testes sejam realizados no método de posicionamento relativo (modo estático e cinemático);
- ✓ Testar o modelo de PNT ETA 15 km (grade de 15 km x 15 km) disponível desde fevereiro de 2012 em novos experimentos (maiores detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em Gouveia (2013));
- ✓ Futuramente, empregar redes com distância entre as estações inferiores àquelas utilizadas nesta pesquisa, e analisar os resultados;
- ✓ Avaliar o comportamento do atraso troposférico separadamente empregando os diferentes modelos teóricos e de PNT empregados na pesquisa, pois apenas avaliou-se sua qualidade no posicionamento;
- ✓ Avaliar o EMQ em cada época de observação, a fim de avaliar o comportamento do atraso troposférico no decorrer do dia;
- ✓ Elaborar uma função de mapeamento baseada em PNT que atenda as condições troposféricas da região brasileira;

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, A. J.G. **Implementação de uma Rede de Estações de Referência GPS para Posicionamento em Tempo Real**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática), Departamento de Matemática, Universidade de Lisboa. Lisboa, 2006.

AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod\_Ion): Implementação em Tempo Real**. 2005. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; FORTES, L. P. S. Descrição dos principais algoritmos de correção para RTK em rede. In: **III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2003, Curitiba. III CBCG - Anais em CD-ROM. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2003.

ALVES, D. B. M. **Posicionamento Baseado em redes GPS utilizando o conceito de estação virtual**, 2008. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A (2009). **Análise do modelo troposférico empregado na geração de uma estação de referência virtual utilizando o posicionamento por ponto preciso**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 15, n. 3. p. 373-387, 2009.

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. **GPS Solutions**, v.15, n. 3, p. 253-261, 2011.

ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The effects of network geometry on network RTK using simulated GPS data. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. **Proceedings...**, 2003.

AMOR, M.; LUTTENBERGER, C. Introducción al concepto de redes VRS (Virtual Reference Stations). In: **VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía**, 2004, Madrid.

AZPILLICUETA, F.; BRUNINI, C.; RADICELLA, S. M. **Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude**. Advances in Space Research, 38, p. 2324-2331, 2006.

BKG – **Bundesamt für Kartographie und Geodäsie**. Disponível em: <<http://igs.bkg.bund.de/ntrip.html>>. Acesso em: jan. 2013.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna mapping functions in VLBI analyses. **Geophysical Research Letters**. v.31. 2004.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data. **Geophysical Research Letters**. v.33. 2006a.

BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. **Journal of Geophysical Research**. v.111. 2006b.

BROWN, N.; KEENAN, R.; RICHTER, B.; TROYER, L. **Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM V3.0 master auxiliary messages**. ION GNSS 2005, Long Beach, CA. September 13-16, 2005.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

**Centro de Informação GALILEO**, 04 de fevereiro de 2013. Disponível em: <http://http://www.galileoic.org/node/149>.

CHEN, W.; HU, C.; GAO, S.; CHEN, Y.; DING, X.; KOWK, C. Precise Estimation of Absolute Ionospheric Delay Base on GPS Active Network. In: ION GNSS 2004, Long Beach, Califórnia. **Proceedings...** 2004.

CHEN, X.; ALLISON, T.; CAO, W.; FERGUSON, K.; GRUNIG, S.; GOMEZ, V.; KIPKA, A.; KOEHLER, J.; LANDAU, H.; LEANDRO, R.; LU, G.; STOLZ, R.; TALBOT, N. Trimble RTX, an Innovative New Approach for Network RTK. In: ION GNSS 2011, Portland, Oregon, EUA. **Proceedings...** 2011.

CPTEC – Centro de Previsão de tempo e Estudos Climáticos. **Atraso Zenital Troposférico**. Disponível em: <<http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/prev.htm>>. Acesso em: 05 abr. 2012.

COLOMBO, O. L. Long-Distance Kinematic GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2ed. Berlin: Springer Verlage, 1998, p.537-568.

DAI, L.; WANG, J.; RIZOS, C.; HAN, S. Predicting atmospheric biases for real-time ambiguity resolution in GPS/GLONASS reference station networks. **Journal of Geodesy**, Berlin v. 76 nº11/12, p.617-628, 2003.

**DRAGON IN SPACE**. Disponível em < <http://www.dragoninspace.com/navigation/compass-beidou2.aspx> >. Acessado em 11 de fevereiro de 2013.

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. **ECMWF Deterministic Atmospheric Model**. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/products/catalogue/l.html>>. Acesso em: 21 mai. 2012.

EULER, H-J.; KEENAN, C. R.; ZEBHAUSER, B. E.; WÜBBENA, G. Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, UT, **Proceedings...** 2001.

FORTES, L. P. S. **Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning**. 2002. 355f. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.

FOTOPOULOS, G. **Parameterization of DGPS carrier phase errors over a regional network of reference stations**. 2000. 202f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

FREIBERGER JUNIOR, J.: **Análise da degradação do posicionamento em tempo real com o emprego do GNRT**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

FRÖHLICH, M. **The high precise permanent positioning service (HPPS) in north Germany – test and first results**. 1994. 3 rd Int. Conf. on differential satellite navigation systems, London, England.

**GALILEOIC**. Disponível em < <http://www.galileoic.org/node/149> >. Acessado em 11 de fevereiro de 2013.

GAO, Y.; LI, Z. Ionosphere Effect and Modeling for Regional Area Differential GPS Network. In: ION GPS 1998, Nashville, Tennessee. **Proceedings...** 1998.

GAO, Y.; LIU, Z. e LIU, Z. Z. Internet-Based Real-Time kinematic positioning. **GPS Solutions**, v.5, n.3, p.61-69, 2002.

GEGE – **Grupo de Estudo em Geodésia Espacial**. Disponível em: <[http://gege.prudente.unesp.br/index\\_port.php?p=50](http://gege.prudente.unesp.br/index_port.php?p=50)>. Acesso em: 15 Abr. 2012.

GOUVEIA, T. A. F. **Modelagem Troposférica para a América do Sul com Assimilação de Dados e sua avaliação no posicionamento GNSS**, 2013. Dissertação (mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

**GPS.gov**. Disponível em < <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acessado em 11 de fevereiro de 2013.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M. **Performance of IGS ionosphere TEC maps**. IGS IONO WG Report. Research group of Astronomy and Geomatics, Technical University of Catalonia (GAGE/UPC) Barcelona, Spain, March, 2003.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo and more**. Springer-Verlage Wien, 2008.

HU, G. R.; KHOO, V. H. S.; GOH, P. C.; LAW, C. L. Internet-based GPS VRS RTK Positioning with a Multiple Reference Station Network. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.113-120, 2003.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 04/04/2012.

IGS - International GNSS Service. **IGS PRODUCTS**. Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: out. 2013a.

IGS – International GNSS Service. **Ionosphere Working Group**. Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/projects/iono/index.html>>. Acesso em: out. 2013b.

INCRA. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais. - 2ª Edição/ Revisada, 2010**. Disponível em: <http://www.incra.gov.br/portal/index.php?>

option=com\_content&view=section&layout=blog&id=10&Itemid=63 . Acesso em: 04/11/12.

JANSSEN, V. A. Comparison of the VRS and MAC principles for network RTK. In: IGNSS Symposium, Australia. **Proceedings...** 2009.

KALNAY, E. **Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability**. Cambridge University Press, London, p. 341, 2003.

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric effects on GPS**. In: PARKINSON, B. W.; PILKER, J. J., Global positioning system: theory and applications. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, v.II, p. 485-515, 1996.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991.

KOUBA, J. Implementation and testing of the gridded Vienna mapping function 1 (VMF1). **Journal of Geodesy**, v. 82, p. 193-205, 2007.

KRUEGER, C.P. **Posicionamento Cinemático de Trens**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1994.

KRUEGER, C. P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1996.

LACHAPELLE, G.; ALVES, P. Multiple reference station approach: overview and current research. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.133-136, 2002.

LANDAU, H.; VOLLATH, U.; CHEN, X. Virtual reference station systems. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.137-143, 2002.

LEANDRO, D. **Investigação do Posicionamento GPS em Ambientes Internos com o Auxílio do Efeito de Multicaminho**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2009.

LEANDRO, R.; LANDAU, H.; NITSCHKE, M.; GLOCKER, M.; SEEGER, S.; CHEN, X.; DEKING, A.; TAHAR, M.B.; ZHANG, F.; STOLZ, R.; TALBOT, N.; LU, G.; FERGUSON, K.; BRANDL, M.; GOMEZ, V.; KIPKA, A. RTX Positioning: The Next Generation of cm-accurate Real-time GNSS Positioning. In: ION GNSS 2011, Portland, Oregon, EUA. **Proceedings...** 2011.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2ª Edition, Wiley-Interscience Publication, 1995.

LIU, Z.; GAO, Y. Development and Evaluation of a New 3-D Ionospheric Modeling Method. **Navigation**. v. 51, n.4, p.311-329, 2004.

MAREL, H. Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. In: ION GPS 1998, Nashville, Tennessee. **Proceedings...** 1998.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de Funções para a Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS.** 2003. 164f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 56, 2004.

MATSUOKA, M. T. **Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na região Brasileira.** 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando Dados de Receptores GPS de Dupla Frequência para a Produção de Mapas da Ionosfera para a Região Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 56/01, 2004.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira.** 2007. 263f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS. Descrição, Fundamentos e Aplicações.** São Paulo, Editora UNESP, 2008.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C (2009). **Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada.** Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 15, n. 3. p. 469-483, 2009.

ODIJK, D. Improving Ambiguity Resolution by Applying Ionosphere Corrections from a Permanent GPS Array. **Earth Planets Space**, v.52, p.675-680, 2000.

**NGS.** Disponível em <<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>>. Acessado em 20 de abril de 2012.

NIELL, A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. **Journal of Geophysical Research.** v.101, n.B2, p.3227-3246, 1996.

NIELL, A.; PETROV, L. Using a Numerical Weather model to improve Geodesy. In: The State of GPS Vertical Positioning Precision, Luxembourg. **Proceedings...** 2003.

NIEVINSKI F.G. **Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS.** 2009. 230f. Dissertação (MSc) – University of New Brunswick, Canada.

NTRIP – **Networked Transport of RTCM via Internet Protocol.** Disponível em: <[http://igs.bkg.bund.de/index\\_ntrip.htm](http://igs.bkg.bund.de/index_ntrip.htm)>. Data de acesso: 06 de abril de 2012.

ODIJK, D. Improving Ambiguity Resolution by Applying Ionosphere Corrections from a Permanent GPS Array. **Earth Planets Space**, v.52, p.675-680, 2000.

ODIJK, D.; TEUNISSEN, P. A. Theoretical study on the bottlenecks of GPS phase Ambiguity resolution in a CORS RTK Network. **Journal of Geodetic Science**. v.1, n.2, p.143-153, 2011.

PRADO, A.; KRUEGER, C. P. **Análise da acurácia nos posicionamentos diferenciais aplicando as técnicas DGPS e RTK**. Revista Brasileira de Cartografia Nº 55/01, Julho 2003.

RAMOS, A. M. **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2007.

RAQUET, J. Test of a 400 km x 600 km Network of Reference Receivers for Precise Kinematic Carrier-Phase Positioning in Norway. In: ION GPS 1998, Nashville, TN. **Proceedings...** 1998.

RIZOS, C. Network RTK research and implementation - A geodetic perspective. **Journal of Global Positioning System**, v.1, n.2, p.144-150, 2002.

RIZOS, C.; HAN, S. Reference Station Network Based RTK Systems - Concepts and Progress. **Wahun University Journal of Nature Sciences**, v.8, n.2B, p.566-574, 2003.

RTCM - THE RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR MARITIME SERVICES. **STANDARD 10403.1 for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Services)** – Version 3.1. Comitê Especial RTCM Nº 104, 2006.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do Vapor D'água Atmosférico e a Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS**. 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. Predição do Atraso Zenital Troposférico na América do Sul para Posicionamento GNSS em Tempo Real. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Paraná, Curitiba, 2003. **Anais...**, 2003.

SAPUCCI, L F; MACHADO, L A T; MONICO, J F G . Aplicações dos Valores do IWV Provenientes das Redes de Receptores GPS para Suporte à Previsão Numérica de Tempo no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 49-55, 2008.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; ROSA, G. P. S (2008). **Avaliação das Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul obtidas usando Modelo de Previsão Numérica de Tempo com Alta Resolução Espacial**. Boletim de Ciências Geodésicas. v.14, n.4, 2008.

SAASTAMOINEM, J. Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction. **Bulletin Geodésique**, vol. 105, Sept 1972, vol. 106, Dec 1972, vol. 107, March, 1973.

SCHAER, S.; GURTNER, W.; FELTENS, J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1. In: IGS AC WorkShop, 1998, Darmstadt, Alemanha. **Proceedings...** 1998.

SCHAER, S. **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System**. 1999. 205f. Dissertação (MSc) – University of Bern, Switzerland.

SEEBER, G. **Real Time Satellite Positioning on the Centimeter Level in the 21<sup>st</sup> century using Permanent Reference Stations**. Nordic Summer Scholl, Fevik, Norway, 2000.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003.

SEJAS, M. I., KRUEGER, C. P., HECK, B., SEITZ, K. Análise da Qualidade de um Posicionamento Empregando Estações de Referência Virtuais In: **Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas - Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas**, Curitiba, 2003. v.1.

SHRESTHA, S. M. **Investigations into the Estimation of Tropospheric Delay and Wet Refractivity Using GPS Measurements**. 2003. 156f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

SPIPKER Jr., J. J. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER Jr., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.517-546.

TALBOT, N., LU, G.; ALISSON, T.; VOLLATH, U. Broadcast Network RTK – Transmission standards and results. In: ION GPS 2002, Portland, Oregon, p.2379-2387, **Proceedings of...** 2002.

TANAJURA, E. L. X.; KRUEGER, C. P.; GONÇALVES, R. M. (2011). **Análise da acurácia dos métodos cinemáticos de posicionamento GPS em aplicações costeiras**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 17, p. 23-36, 2011.

TEKE, K. BOEHM, J. NILSSON, T. SCHUH, H. STEIGENBERGER, P. DACH, R. HEINKELMANN, R. WILLIS, P. HAAS, R. GARCIA-ESPADA, S. HOBIGER, T. ICHIKAWA, R. SHIMIZU, S. Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during CONT08. **Journal of Geodesy**, v. 85, n°7, p. 395 - 413, 2011.

**Trimble® GPS, guidance and precision agriculture solutions for all seasons, all crops, all terrains, all vehicles**. Portfolio 2010. Disponível em: < [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-376567/022503-078C-UK\\_Ag\\_Portfolio\\_BRO\\_0108\\_Ir.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-376567/022503-078C-UK_Ag_Portfolio_BRO_0108_Ir.pdf) >. Acesso em: 28 Jan. 2013.

URAKAWA, M. J., HECK, B., SEITZ, K., KRUEGER, C. P. **Determinação e Comparação de Coordenadas Geodésicas Precisas Utilizando os Conceitos FKP e VRS** In: III Anais do COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODESICAS - Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2003 v.1.

VEY, S.; DIETRICH, R.; FRITSCH, M.; RÜLKE, A. Influence of mapping function parameters on global GPS network analyses: comparisons between NMF and IMF. **Geophysical Research Letters**, vol. 33. 2006.

VOLLATH, U., DEKING, A., LANDAU, H. Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations. In: ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah. **Proceedings...** 2000.

VOLLATH, U.; LANDAU, H.; CHEN, X.; DOUCET, K.; PAGELS, C. Network RTK Versus Single Base RTK – Understanding the Error Characteristics. In: ION GNSS 2002, Portland, OR. **Proceedings...** 2002.

WANNINGER, L. Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere. In: ION GPS 1995, Palm Springs. **Proceedings...** 1995.

WANNINGER, L. Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks. In: IAG SCIENTIFIC ASSEMBLY, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...** 1997.

WANNINGER, L. **Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks**. Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Set. 1997, IAG Symposia 118, Springer Verlag, 86-92. Disponível em: <<http://www.wasoft.de/virt/pub/inhalt.html>>. Acesso em: 03 nov. 2012.

WELLS, D. **Guide to GPS Positioning**. New Brunswick, University of New Brunswick Graphic Services, 1986.

ZHANG, K.; ROBERTS, C. Network-Based Real-Time Kinematic Positioning System: Current Development in Australia. In: Geoinformatics and Surveying Conference, 2003, The Institute of Surveyor, Malasia. **Proceedings...** 2003.

**APÊNDICE A**

## (Implementação da Função de Mapeamento de Vienna (VMF1))

```

// Criando o membro para baixar os 5 arquivos dos coeficientes ah, aw e atraso troposférico
// PNT/ECMWF no site http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/

void AtrasoTroposferico::DownloadTropoECMWF(long ano, long mes, long dia)
{
//Comentários para o DOXYGEN
/*!
 * \brief Método utilizado para baixar o ZTD de um endereço específico.
 *
 * Para baixar o ZTD, o nome do arquivo é gerado automaticamente
 * utilizando dados referentes ao dia em questão.
 *
 * \param ano - ano no qual o experimento está sendo realizado (in).
 * \param mes - mes no qual o experimento está sendo realizado (in).
 * \param dia - dia no qual o experimento está sendo realizado (in).
 * \param SegundosDia - Segundos do dia (in).
 *
 * \author Daniele Barroca Marra Alves
 * \date 01/04/2009
 * \since 31/03/2009
 * \version 1.0
 */
//Gerando o nome dos arquivos de PNT e baixando do site

//Gerando o nome para baixar o arquivo através de ftp

//Gerando as variáveis auxiliares
String AnoString, MesString, DiaString, MesAuxString, DiaAuxString;
char MesAux[3], MesAux1[2], DiaAux[3], DiaAux1[2];
char NomeTrop0[200];
char NomeTrop6[200];
char NomeTrop12[200];
char NomeTrop18[200];
char NomeTrop24[200];

//Passando o ano para string
AnoString = IntToStr(ano);
//Passando o mes para string - tomar cuidado com mes 01,02....09, tem que
//colocar o zero na escrita
if (mes < 10)
{
MesAuxString = IntToStr(mes);
StrCopy(MesAux1, MesAuxString.c_str());
MesAux[0]='0';
MesAux[1]= MesAux1[0];
MesAux[2]= '\0';
MesString = MesAux;
}
else
MesString = IntToStr(mes);
//Passando o dia para string - tomar cuidado com dia 01,02...09, tem que
//colocar o zero na escrita
if (dia < 10)
{
DiaAuxString = IntToStr(dia);
StrCopy(DiaAux1, DiaAuxString.c_str());
DiaAux[0]='0';
DiaAux[1]= DiaAux1[0];
DiaAux[2]= '\0';
DiaString = DiaAux;
}
else
DiaString = IntToStr(dia);

//Gerando o nome para baixar o arquivo através de http - arquivo 0 hora

strcpy(NomeTrop0, "VMFG_");
//Concatenando os demais elementos do nome
strcat(NomeTrop0, AnoString.c_str());
strcat(NomeTrop0, MesString.c_str());
strcat(NomeTrop0, DiaString.c_str());
strcat(NomeTrop0, ".H00");

```

```

//Gerando Arquivo com as informações do PNT/ECMWF a ser baixada
char *Arq0;
Arq0 = "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF0.bat";
ofstream out0 (Arq0);

//Escrevendo no arquivo
out0 << "cd DadosEntrada\\ArquivosECMWF" << endl
<< "C:\\VRS\\Aplicativos\\wget\\wget.exe
http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/" -c
<< AnoString << "/" << NomeTrop0;

out0.close();

//Baixando o arquivo sp3 http
system("C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF0.bat");
// cout << "\nbaixou o 1 \n" ;
// system("pause");

//-----

//Gerando o nome para baixar o arquivo através de http - arquivo 6 horas

strcpy(NomeTrop6, "VMFG_");
//Concatenando os demais elementos do nome
strcat(NomeTrop6, AnoString.c_str());
strcat(NomeTrop6, MesString.c_str());
strcat(NomeTrop6, DiaString.c_str());
strcat(NomeTrop6, ".H06");

//Gerando Arquivo com as informações do PNT/ECMWF a ser baixada
char *Arq6;
Arq6 = "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF6.bat";
ofstream out6 (Arq6);

//Escrevendo no arquivo
out6 << "cd DadosEntrada\\ArquivosECMWF" << endl
<< "C:\\VRS\\Aplicativos\\wget\\wget.exe -c
http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/"
<< AnoString << "/" << NomeTrop6;

out6.close();

//Baixando o arquivo ZTD http
system("C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF6.bat");
// cout << "\nbaixou o 2 \n";
// system("pause");

//-----

//Gerando o nome para baixar o arquivo através de http - arquivo 12 horas

strcpy(NomeTrop12, "VMFG_");
//Concatenando os demais elementos do nome
strcat(NomeTrop12, AnoString.c_str());
strcat(NomeTrop12, MesString.c_str());
strcat(NomeTrop12, DiaString.c_str());
strcat(NomeTrop12, ".H12");

//Gerando Arquivo com as informações do PNT/ECMWF a ser baixada
char *Arq12;
Arq12 = "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF12.bat";
ofstream out12 (Arq12);

//Escrevendo no arquivo
out12 << "cd DadosEntrada\\ArquivosECMWF" << endl
<< "C:\\VRS\\Aplicativos\\wget\\wget.exe -c
http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/"
<< AnoString << "/" << NomeTrop12;

out12.close();

//Baixando o arquivo sp3 ftp
system("C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF12.bat");
// cout << "\nbaixou o 3 \n";
//system("pause");

//-----

```

```

//Gerando o nome para baixar o arquivo através de http - arquivo 18 horas
strcpy(NomeTrop18, "VMFG_");
//Concatenando os demais elementos do nome
strcat(NomeTrop18, AnoString.c_str());
strcat(NomeTrop18, MesString.c_str());
strcat(NomeTrop18, DiaString.c_str());
strcat(NomeTrop18, ".H18");

//Gerando Arquivo com as informações do PNT/ECMWF a ser baixada
char *Arq18;
Arq18 = "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF18.bat";
ofstream out18(Arq18);

//Escrevendo no arquivo
out18 << "cd DadosEntrada\\ArquivosECMWF" << endl
<< "C:\\VRS\\Aplicativos\\wget\\wget.exe" -c
http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/"
<< AnoString << "/" << NomeTrop18;

out18.close();

//Baixando o arquivo sp3 ftp
system("C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF18.bat");
// cout << "\nbaixou o 4 \n" ;
// system("pause");
} // fim do membro

//-----//

/*****
// Criando o membro para baixar atraso troposférico 24 horas (Adeliton);
//
*****/

void AtrasoTroposferico::DownloadTropoECMWF0(long ano, long mes, long dia)
{
//Gerando o nome para baixar o arquivo através de http

//Gerando as variáveis auxiliares
String AnoString, MesString, DiaString, MesAuxString, DiaAuxString;
char MesAux[3], MesAux1[2], DiaAux[3], DiaAux1[2];
char NomeTrop24[200];

//Passando o ano para string
AnoString = IntToStr(ano);
//Passando o mes para string - tomar cuidado com mes 01,02...09, tem que
//colocar o zero na escrita
if (mes < 10)
{
MesAuxString = IntToStr(mes);
StrCopy(MesAux1, MesAuxString.c_str());
MesAux[0]='0';
MesAux[1]= MesAux1[0];
MesAux[2]= '\0';
MesString = MesAux;
}
else
MesString = IntToStr(mes);
//Passando o dia para string - tomar cuidado com dia 01,02...09, tem que
//colocar o zero na escrita
if (dia < 10)
{
DiaAuxString = IntToStr(dia);
StrCopy(DiaAux1, DiaAuxString.c_str());
DiaAux[0]='0';
DiaAux[1]= DiaAux1[0];
DiaAux[2]= '\0';
DiaString = DiaAux;
}
else
DiaString = IntToStr(dia);

//Concatenando o nome dos elementos do nome

```

```

strcpy(NomeTrop24, "VMFG_");
strcat(NomeTrop24, AnoString.c_str());
strcat(NomeTrop24, MesString.c_str());
strcat(NomeTrop24, DiaString.c_str());
strcat(NomeTrop24, ".H00");

//Gerando Arquivo com as informações do PNT/ECMWF a ser baixada
char *Arq24;
Arq24 = "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF24.bat";
ofstream out24 (Arq24);

//Escrevendo no arquivo
out24 << "cd DadosEntrada\\ArquivosECMWF" << endl
<< "C:\\VRS\\Aplicativos\\wget\\wget.exe" -c
http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/"
<< AnoString << "/" << NomeTrop24;
out24.close();

//Baixando o arquivo sp3 http
system("C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\ECMWF24.bat");

} // fim do membro DownloadTropoECMWF...

//-----//
/*****/
//Membro LeituraTropoECMWF --> Função de realizar a leitura do arquivos baixados no diretório
(C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF) //
//e fazer a interpolação bilinear para a posições da Estação Base da Rede (SPAR) e posição da
VRS (PPTE) nos arquivos de 0h, 6h, 12h, 18h//
//e 24h
//
/*****/

void AtrasoTroposferico::LeituraTropoECMWF(long ano, long mes, long dia, long diaseg, double
lat_point,
double lon_point, double alt_point, double ah_point[5], double aw_point[5], double
Zhd_point[5], double Zwd_point[5])

{

/* Nessa função é atribuído a nomenclatura para os arquivos que se encontram no diretório
(C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF)

*/

Class_Grid grid;

//Gerando as variáveis auxiliares

String AnoString, MesString, DiaString, MesAuxString, DiaAuxString;
char MesAux[3], MesAux1[2],DiaAux[3], DiaAux1[2];
char NomeTropAux0[200], NomeTropAux1[200], NomeTropAux2[200], NomeTropAux3[200];
char str[100];
int ano_in, mes_in, dia_in, hora_in, min_in, seg_in;
double escala;
double lat_in, lat_end, lon_in, lon_end, lat_rate, lon_rate;

//Passando o ano para string
AnoString = IntToStr(ano);
//Passando o mes para string - tomar cuidado com mes 01,02...09, tem que
//colocar o zero na escrita
if (mes < 10)
{
MesAuxString = IntToStr(mes);
StrCopy(MesAux1, MesAuxString.c_str());
MesAux[0]='0';
MesAux[1]= MesAux1[0];
MesAux[2]= '\0';
MesString = MesAux;
}
else
MesString = IntToStr(mes);
//Passando o dia para string - tomar cuidado com dia 01,02...09, tem que
//colocar o zero na escrita

```

```

if (dia < 10)
{
    DiaAuxString = IntToStr(dia);
    StrCopy(DiaAux1, DiaAuxString.c_str());
    DiaAux[0]='0';
    DiaAux[1]= DiaAux1[0];
    DiaAux[2]= '\0';
    DiaString = DiaAux;
}
else
    DiaString = IntToStr(dia);

//Gerando o nome do arquivo através de http no diretório (Adeliton)

strcpy(NomeTropAux0, "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\");
strcat(NomeTropAux0, "VMFG_");
strcat(NomeTropAux0, AnoString.c_str());
strcat(NomeTropAux0, MesString.c_str());
strcat(NomeTropAux0, DiaString.c_str());
strcat(NomeTropAux0, ".H00");
//Gerando o nome do arquivo de 06 horas

strcpy(NomeTropAux1, "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\");
strcat(NomeTropAux1, "VMFG_");
strcat(NomeTropAux1, AnoString.c_str());
strcat(NomeTropAux1, MesString.c_str());
strcat(NomeTropAux1, DiaString.c_str());
strcat(NomeTropAux1, ".H06");
//Gerando o nome do arquivo de 12 horas

strcpy(NomeTropAux2, "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\");
strcat(NomeTropAux2, "VMFG_");
strcat(NomeTropAux2, AnoString.c_str());
strcat(NomeTropAux2, MesString.c_str());
strcat(NomeTropAux2, DiaString.c_str());
strcat(NomeTropAux2, ".H12");
//Gerando o nome do arquivo de 18 horas

strcpy(NomeTropAux3, "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\");
strcat(NomeTropAux3, "VMFG_");
strcat(NomeTropAux3, AnoString.c_str());
strcat(NomeTropAux3, MesString.c_str());
strcat(NomeTropAux3, DiaString.c_str());
strcat(NomeTropAux3, ".H18");

//Gerando as variáveis auxiliares
char NomeTropAux4[200];

// Modificando o dia para download do dia seguinte (Adeliton)

//Passando o dia para string - tomar cuidado com dia 01,02...09, tem que
//colocar o zero na escrita
if (dia < 10)
{
    DiaAuxString = IntToStr(diaseg);
    StrCopy(DiaAux1, DiaAuxString.c_str());
    DiaAux[0]='0';
    DiaAux[1]= DiaAux1[0];
    DiaAux[2]= '\0';
    DiaString = DiaAux;
}
else
    DiaString = IntToStr(diaseg);

//Gerando o nome do arquivo de 24 horas

strcpy(NomeTropAux4, "C:\\VRS\\DadosEntrada\\ArquivosECMWF\\");
strcat(NomeTropAux4, "VMFG_");
strcat(NomeTropAux4, AnoString.c_str());
strcat(NomeTropAux4, MesString.c_str());
strcat(NomeTropAux4, DiaString.c_str());
strcat(NomeTropAux4, ".H00");

// printf("%s\n", NomeTropAux0);
//system ("pause");
//-----//
// Abrindo os Arquivos de 0h, 6h, 12h, 18h e 24h;

```

```

char temp[100],comment[100],info[200];
char source[100], type[100];
int version;
int i=0;

ifstream in_trop0(NomeTropAux0);
ifstream in_trop1(NomeTropAux1);
ifstream in_trop2(NomeTropAux2);
ifstream in_trop3(NomeTropAux3);
ifstream in_trop4(NomeTropAux4);
ifstream *in_trop;

//printf("\n          %s          %s          %s          %s          %s          %s          \n",
NomeTropAux0,NomeTropAux1,NomeTropAux2,NomeTropAux3,NomeTropAux4);

//-----//
// Leitura do cabeçalho do arquivo de 00h a 24h do dia (Linhas de 1 a 7);
int u;

// for --> Possibilita a leitura e interpolação bilinear dos 5 arquivos respectivamente
(Adeliton);

for(u = 0; u <5; u++) {

    if(u==0) {
        in_trop =&in_trop0;
        in_trop0 >> str;
    }

    else if(u==1) {
        in_trop =&in_trop1;
        in_trop1 >> str;
    }

    else if(u==2) {
        in_trop2 >> str;
        in_trop =&in_trop2;
    }

    else if(u==3) {
        in_trop3 >> str;
        in_trop =&in_trop3;
    }

    else {
        in_trop4 >> str;
        in_trop =&in_trop4;
    }

// Leitura do cabeçalho dos 5 arquivos (Adeliton)

/* while (strcmp(str, "Version:") != 0){ in_trop >> str;}
in_trop >> version;

while (strcmp(str, "Source:") != 0 ){ in_trop >> str;}
in_trop >> source;

while (strcmp(str, "Data_types:") != 0 ){ in_trop >> str;}
in_trop >> type;*/

while (strcmp(str, "Epoch:") != 0 ){ *in_trop >> str;}
*in_trop >> ano_in >> mes_in >> dia_in >> hora_in >> min_in >> seg_in;

while (strcmp(str, "Scale_factor:") != 0 ){ *in_trop >> str;}
*in_trop >> escala;

while (strcmp(str, "Range/resolution:") != 0 ){ *in_trop >> str;}
*in_trop >> lat_in >> lat_end >> lon_in >> lon_end >> lat_rate >> lon_rate;

while (strcmp(str, "Comment:") != 0 ){ *in_trop >> str;}
*in_trop >> comment;

/*****
// Leitura dos dados lat, lon, ah, aw, zhd e zwd do Grid de acordo com a posição do usuário na
quadrícula;
*****/

/*

```

```

Obs.: Nesse membro os valor dos coeficientes ah, aw, zhd e zwd é determinado no Grid
por meio da função Set (Ver Class_Grid.cpp e Class_Grid.h) conforme as coordenadas
disponibilizadas pelo usuário. Já a função Get permite a manipulação dos coeficientes
setados e assim aplicar a interpolação bilinear para os 5 arquivos diários;

*/

double Set_Lat, Set_Lon, Set_ah, Set_aw, Set_Zhd, Set_Zwd, Get_Lat;
double lat,lon;
double ah,aw,zhd,zwd;

in_trop->getline(temp,100);

while( !(in_trop)->eof() )
{
    in_trop->getline(temp,100);

    sscanf(temp,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf",&lat,&lon,&ah,&aw,&zhd,&zwd);
    //printf("%lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",lat,lon,ah,aw,zhd,zwd);
    //system("pause");

    if(fabs(lat-lat_point) <= lat_rate && fabs(lon-lon_point)<= lon_rate)
    { //set information of the first point

        if(grid.Get_Lat(1)==0)
        { //Informação do 1º ponto;
            grid.Set_Lat(lat,1);
            grid.Set_Lon(lon,1);
            grid.Set_ah(ah,1);
            grid.Set_aw(aw,1);

            grid.Set_Zhd(zhd,1);
            grid.Set_Zwd(zwd,1);

            //Leitura do 2º ponto;
            in_trop->getline(temp,80);
            sscanf(temp,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf",&lat,&lon,&ah,&aw,&zhd,&zwd);

            //Informação do 2º ponto;
            grid.Set_Lat(lat,2);
            grid.Set_Lon(lon,2);
            grid.Set_ah(ah,2);
            grid.Set_aw(aw,2);

            grid.Set_Zhd(zhd,2);
            grid.Set_Zwd(zwd,2);

        }
        else if(grid.Get_Lat(3)==0)
        {
            //Informação do 3º ponto;
            grid.Set_Lat(lat,3);
            grid.Set_Lon(lon,3);
            grid.Set_ah(ah,3);
            grid.Set_aw(aw,3);

            grid.Set_Zhd(zhd,3);
            grid.Set_Zwd(zwd,3);

            //Leitura do 4º ponto;
            in_trop->getline(temp,80);
            sscanf(temp,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf",&lat,&lon,&ah,&aw,&zhd,&zwd);

            //Informação do 4º ponto;
            grid.Set_Lat(lat,4);
            grid.Set_Lon(lon,4);
            grid.Set_ah(ah,4);
            grid.Set_aw(aw,4);

            grid.Set_Zhd(zhd,4);
            grid.Set_Zwd(zwd,4);
            // break;
        }//else
    }//if

} //while
//in_trop->close();

```

```

// Interpolação Bilinear dos coeficientes ah,aw,zhd,zwd (Adeliton);

//printf("\n hidros[%u] %lf %lf %lf %lf %lf \n",u, grid.Get_ah(2),grid.Get_ah(3),
// grid.Get_Lon(2), grid.Get_Lon(3), lon_point);
//system("pause");
//printf("%lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",lat,lon,ah,aw,zhd,zwd);
//system("pause");

grid.Linear_Interp (grid.Get_ah(1),grid.Get_ah(2),grid.Get_ah(3),grid.Get_ah(4),
                    grid.Get_Lon(1), grid.Get_Lon(2),grid.Get_Lon(3), grid.Get_Lon(4),
                    grid.Get_Lat(1), grid.Get_Lat(2),grid.Get_Lat(3), grid.Get_Lat(4),
                    lat_point, lon_point,ah_point[u]);

grid.Linear_Interp (grid.Get_ah(1),grid.Get_ah(2),grid.Get_ah(3),grid.Get_ah(4),
                    grid.Get_Lon(1), grid.Get_Lon(2),grid.Get_Lon(3), grid.Get_Lon(4),
                    grid.Get_Lat(1), grid.Get_Lat(2),grid.Get_Lat(3), grid.Get_Lat(4),
                    lat_point, lon_point,aw_point[u]);

grid.Linear_Interp (grid.Get_Zhd(1),grid.Get_Zhd(2),grid.Get_Zhd(3),grid.Get_Zhd(4),
                    grid.Get_Lon(1), grid.Get_Lon(2),grid.Get_Lon(3), grid.Get_Lon(4),
                    grid.Get_Lat(1), grid.Get_Lat(2),grid.Get_Lat(3), grid.Get_Lat(4),
                    lat_point, lon_point,Zhd_point[u]);

grid.Linear_Interp (grid.Get_Zwd(1),grid.Get_Zwd(2),grid.Get_Zwd(3),grid.Get_Zwd(4),
                    grid.Get_Lon(1), grid.Get_Lon(2),grid.Get_Lon(3), grid.Get_Lon(4),
                    grid.Get_Lat(1), grid.Get_Lat(2),grid.Get_Lat(3), grid.Get_Lat(4),
                    lat_point, lon_point,Zwd_point[u]);

// Zerar a função;
in_trop->close();
    grid.Set_Lat(0,3);
    grid.Set_Lon(0,3);
    grid.Set_ah(0,3);
    grid.Set_ah(0,3);
    grid.Set_ah(0,3);
    grid.Set_Zhd(0,3);
    grid.Set_Zwd(0,3);

    grid.Set_Lat(0,1);
    grid.Set_Lon(0,1);
    grid.Set_ah(0,1);
    grid.Set_ah(0,1);
    grid.Set_ah(0,1);
    grid.Set_Zhd(0,1);
    grid.Set_Zwd(0,1);

} //for u

} //fim da funcao LeituraTropoECMWF

/*****
*****/
// Membro que calcula Interpolação Linear VMF1 em relação ao "Tempo" para a Estação Base
(Adeliton);
/*****
*****/

void AtrasoTroposferico::InterpTroposferaECMWF(double SegTDia, double *Est_ah, double *Est_aw,
double *Est_Zhd, double *Est_Zwd, double &zhd_bas, double &zwd_bas)

{
//Calculando os segundos do dia entre cada arquivo de 6 horas
double Seg0Horas, Seg6Horas, Seg12Horas, Seg18Horas, Seg24Horas;

    Seg0Horas =0;
    Seg6Horas = 21600;
    Seg12Horas = 43200;
    Seg18Horas = 64800;
    Seg24Horas = 86400;

// Interpolação do tempo para o Coeficiente Hidrostático VMF1 "Est_ah"

if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{ah_bas = Est_ah[0]+((SegTDia*(Est_ah[1]- Est_ah[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{ah_bas = Est_ah[1]+((SegTDia*(Est_ah[2]- Est_ah[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))

```

```

{ah_bas = Est_ah[2]+((SegTDia*(Est_ah[3]- Est_ah[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{ah_bas = Est_ah[3]+((SegTDia*(Est_ah[4]- Est_ah[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}
else {ah_bas = Est_ah[4];}

// Interpolação do tempo para o Coeficiente Úmido VMF1 "Est_aw"

if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{aw_bas = Est_aw[0]+((SegTDia*(Est_aw[1]- Est_aw[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{aw_bas = Est_aw[1]+((SegTDia*(Est_aw[2]- Est_aw[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{aw_bas = Est_aw[2]+((SegTDia*(Est_aw[3]- Est_aw[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{aw_bas = Est_aw[3]+((SegTDia*(Est_aw[4]- Est_aw[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}

else {aw_bas = Est_aw[4];}

// Interpolação do tempo para a Componente Hidrostática "Est_Zhd"

if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{zhd_bas = Est_Zhd[0]+((SegTDia*(Est_Zhd[1]- Est_Zhd[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{zhd_bas = Est_Zhd[1]+((SegTDia*(Est_Zhd[2]- Est_Zhd[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{zhd_bas = Est_Zhd[2]+((SegTDia*(Est_Zhd[3]- Est_Zhd[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{zhd_bas = Est_Zhd[3]+((SegTDia*(Est_Zhd[4]- Est_Zhd[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}

else {zhd_bas = Est_Zhd[4];}

// Interpolação do tempo para a Componente Úmida "Est_Zwd"

if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{zwd_bas = Est_Zwd[0]+((SegTDia*(Est_Zwd[1]- Est_Zwd[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{zwd_bas = Est_Zwd[1]+((SegTDia*(Est_Zwd[2]- Est_Zwd[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{zwd_bas = Est_Zwd[2]+((SegTDia*(Est_Zwd[3]- Est_Zwd[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{zwd_bas = Est_Zwd[3]+((SegTDia*(Est_Zwd[4]- Est_Zwd[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}
else {zwd_bas = Est_Zwd[4];}

} // Fim da Função InterpTroposferaECMWF;

/*****
// Membro que calcula a correção de altura "h" para o atraso troposférico para a Estação Base
(Adeliton); //
*****/

// Membro que calcula a correção de altura "h" para o atraso troposférico da Estação Base
e a VRS;
void AtrasoTroposferico::AtrasoECMWFcorrigido(double lat_est, double alt_est, double EZhd,
double EZwd)

{
// Parâmetros de entrada para a correção do atraso úmido e hidrostático ECMWF;
double P0, T0, E0, Es0, Pf, Tf, hi, sig_T, gr, Rl, Deltazhd,Deltazwd, D, e0,e, URo, nep,
Hi, Hf;

T0 = 18; // Temperatura em Kelvin;
hi = 0;
URo = 50;
nep = 2.718281828;
sig_T = 0.0065;
gr = 9.7867;
Rl = 287.058;

```

```

// Correção para a componente hidrostática (Fonte:Bohem e Peter Steigenberger et al.,
2009);
// correção por Saastamoinen;

P0 = EZhd*(1 - 0.00266*cos(2*lat_est*(M_PI/180))- 0.00000028*hi)/0.0022768;
Tf = T0-0.0065*(alt_est - hi);
Pf = P0 * pow(((1-(sig_T/(Tf+273.16)))*(alt_est-hi))),(gr/(sig_T*Rl)));
Deltazhd = 0.0022768*(Pf-P0)/(1 - 0.00266*cos(2*(lat_est*(M_PI/180)))- 0.00000028*hi);
DzhdECMWFbase = EZhd + Deltazhd;

// Correção para a componente úmida (Fonte:Bohem e Peter Steigenberger et al., 2009);

Hi = URO*pow(nep,(-0.0006396*hi));
e0 = (Hi/100)* pow(nep,(-37.2465+(0.213166*(T0+273.16))-(
(0.000256908*pow((T0+273.16),2)))));
Deltazwd = (-2.789*e0/pow((Tf+273.16),2))*(((5383/(Tf+273.16)-0.7803))*(sig_T)*(alt_est));
DzwdECMWFbase = EZwd + Deltazwd;
//system ("pause");

} // fim da função AtrasoECMWFcorrigido

//-----//
/*****/
// Membro que calcula Interpolação Linear VMF1 em relação ao "Tempo" para a VRS (Adeliton);
//
/*****/

void AtrasoTroposferico::InterpTroposferaECMWF1(double SegTDia, double *VRS_ah, double
*VRS_aw, double *VRS_Zhd, double *VRS_Zwd,
double &zhd_vrs, double &zwd_vrs)
{
//Calculando os segundos do dia entre cada arquivo de 6 horas
double Seg0Horas, Seg6Horas, Seg12Horas, Seg18Horas, Seg24Horas;

Seg0Horas =0;
Seg6Horas =21600;
Seg12Horas = 43200;
Seg18Horas = 64800;
Seg24Horas = 86400;

// Interpolação do tempo para o Coeficiente Hidrostático VMF1 "VRS_ah"
if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{ah_vrs = VRS_ah[0]+((SegTDia*(VRS_ah[1]- VRS_ah[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{ah_vrs = VRS_ah[1]+((SegTDia*(VRS_ah[2]- VRS_ah[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{ah_vrs = VRS_ah[2]+((SegTDia*(VRS_ah[3]- VRS_ah[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{ah_vrs = VRS_ah[3]+((SegTDia*(VRS_ah[4]- VRS_ah[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}
else {ah_vrs = VRS_ah[4];}

// Interpolação do tempo para o Coeficiente Úmido VMF1 "VRS_aw"
if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{aw_vrs = VRS_aw[0]+((SegTDia*(VRS_aw[1]- VRS_aw[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{aw_vrs = VRS_aw[1]+((SegTDia*(VRS_aw[2]- VRS_aw[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{aw_vrs = VRS_aw[2]+((SegTDia*(VRS_aw[3]- VRS_aw[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{ah_vrs = VRS_aw[3]+((SegTDia*(VRS_aw[4]- VRS_aw[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}
else {aw_vrs = VRS_aw[4];}

//Interpolação do tempo para a Componente Hidrostática VRS_Zhd ECMWF para a posição da VRS
if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{zhd_vrs = VRS_Zhd[0]+((SegTDia*(VRS_Zhd[1]- VRS_Zhd[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

```

```

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{zhd_vrs = VRS_Zhd[1]+((SegTDia*(VRS_Zhd[2]- VRS_Zhd[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{zhd_vrs = VRS_Zhd[2]+((SegTDia*(VRS_Zhd[3]- VRS_Zhd[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{zhd_vrs = VRS_Zhd[3]+((SegTDia*(VRS_Zhd[4]- VRS_Zhd[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}

else {zhd_vrs = VRS_Zhd[4];}

// Interpolação do tempo para a Componente Úmida VRS_Zwd ECMWF para a posição da VRS

if ((SegTDia >= Seg0Horas) && (SegTDia < Seg6Horas))
{zwd_vrs = VRS_Zwd[0]+((SegTDia*(VRS_Zwd[1]- VRS_Zwd[0]))/(Seg6Horas - Seg0Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg6Horas) && (SegTDia < Seg12Horas))
{zwd_vrs = VRS_Zwd[1]+((SegTDia*(VRS_Zwd[2]- VRS_Zwd[1]))/(Seg12Horas - Seg6Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg12Horas) && (SegTDia < Seg18Horas))
{zwd_vrs = VRS_Zwd[2]+((SegTDia*(VRS_Zwd[3]- VRS_Zwd[2]))/(Seg18Horas - Seg12Horas));}

else if ((SegTDia >= Seg18Horas) && (SegTDia < Seg24Horas))
{zwd_vrs = VRS_Zwd[3]+((SegTDia*(VRS_Zwd[4]- VRS_Zwd[3]))/(Seg24Horas - Seg18Horas));}
else {zwd_vrs = VRS_Zwd[4];}
}

/*****
// Membro que calcula a correção de altura "h" para o atraso troposférico para a Estação Base;
*****/

void AtrasoTroposferico::AtrasoECMWFcorrigido1(double lat_est, double alt_est, double EZhd,
double EZwd)

{
// Parâmetros de entrada para a correção do atraso úmido e hidrostático ECMWF;
double P0, T0, E0, Es0, Pf, Tf, hi, sig_T, gr, Rl, Deltazhd,Deltazwd, D, e0,e, URo, nep,
Hi, Hf;

T0 = 18; // Temperatura em Kelvin;
hi = 0;
URo = 50;
nep = 2.718281828;
sig_T = 0.0065;
gr = 9.7867;
Rl = 287.058;

//Correção para a componente hidrostática (Fonte:Bohem e Peter Steigenberger et al., 2009);
// correção por Saastamoinen;

P0 = EZhd*(1 - 0.00266*cos(2*lat_est*(M_PI/180))- 0.00000028*hi)/0.0022768;
Tf = T0-0.0065*(alt_est - hi);
Pf = P0 * pow(((1-(sig_T/(Tf+273.16)))*(alt_est-hi)),(gr/(sig_T*Rl)));
Deltazhd = 0.0022768*(Pf-P0)/(1 - 0.00266*cos(2*(lat_est*(M_PI/180)))- 0.00000028*hi);
DzhdECMWFvrs = EZhd + Deltazhd;

// Correção para a componente úmida (Fonte:Bohem e Peter Steigenberger et al., 2009);

Hi = URo*pow(nep,(-0.0006396*hi));
e0 = (Hi/100)* pow(nep, (-37.2465+(0.213166*(T0+273.16))-
(0.000256908*pow((T0+273.16),2))));

Deltazwd = (-2.789*e0/pow((Tf+273.16),2))*((5383/(Tf+273.16)-0.7803))*(sig_T)*(alt_est);
DzwdECMWFvrs = EZwd + Deltazwd;
//system ("pause");

} // fim da função AtrasoECMWFcorrigido1;
//-----//

/*****
// Cálculo da Função de Mapeamento VMF1 para as componentes Úmida e Hidrostática;
//
*****/

void AtrasoTroposferico::vmf1_ht_corrigida(double ah, double aw, double dmjd, double dlat,

```

```

double ht, double Ang_Elev)

{
/*
*      !!! This is the version with height correction !!!
*      !!! It has to be used with the grid !!!
*
*      This subroutine determines the VMF1 (Vienna Mapping Functions 1)
*      Reference: Boehm, J., B. Werl, H. Schuh (2006),
*      Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry
*      from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis
data,
*      J. Geoph. Res., Vol. 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
*
*      input data
*      -----
*      ah:  hydrostatic coefficient a (www.hg.tuwien.ac.at/~ecmwfl)
*      aw:  wet coefficient a          (www.hg.tuwien.ac.at/~ecmwfl)
*      dmjd: modified julian date
*      dlat: latitude in radians
*      ht:  ellipsoidal height in meter
*      Ang_Elev: zenith angle in radians
*
*      output data
*      -----
*      vmflh: hydrostatic mapping function
*      vmflw: wet mapping function
*
*      Johannes Boehm, 2005 October 2   */

double a_ht, b_ht, beta, bh, bw, c0h, c10h, c11h, c_ht, ch, cw,
      doy, gamma, hs_km, ht_corr, ht_corr_coef, phh, pi, sine, topcon;

pi = 3.14159265359e0;

/*      reference day is 28 January
*      this is taken from Niell (1996) to be consistent
*/
doy = dmjd - 44239.e0 + 1 - 28;

bh = 0.0029;
c0h = 0.062;
if( dlat < 0.e0 ){ /* southern hemisphere*/
    phh = pi;
    c11h = 0.007;
    c10h = 0.002;
}
else{ /* northern hemisphere*/
    phh = 0.e0;
    c11h = 0.005;
    c10h = 0.001;
}
ch = c0h + ((cos(doy/365.25e0*2.e0*pi+phh) + 1.e0)*c11h/2.e0 +
    c10h)*(1.e0 - cos(dlat));

sine = sin(Ang_Elev*pi/180);
beta = bh/(sine + ch);
gamma = ah/(sine + beta);
topcon = 1.e0 + ah/(1.e0 + bh/(1.e0 + ch));
vmflh = topcon/(sine + gamma);

/* height correction [Niell, 1996]   */
a_ht = 2.53e-5;
b_ht = 5.49e-3;
c_ht = 1.14e-3;
hs_km = ht/1000.e0;
beta = b_ht/(sine + c_ht);
gamma = a_ht/(sine + beta);
topcon = 1.e0 + a_ht/(1.e0 + b_ht/(1.e0 + c_ht));
ht_corr_coef = 1.e0/sine - topcon/(sine + gamma);
ht_corr = ht_corr_coef*hs_km;
vmflh += ht_corr;

bw = 0.00146;
cw = 0.04391;

```

```

    beta = bw/(sine + cw);
    gamma = aw/(sine + beta);
    topcon = 1.e0 + aw/(1.e0 + bw/(1.e0 + cw));
    vmflw = topcon/(sine + gamma);

    return;

} // Fim da função vmfl_ht_corrigida;

/*****
//      Membro que calcula o atraso zenital na direção receptor - satélite;
//
//*****/

// Membro que calcula o atraso zenital na direção receptor - satélite

void AtrasoTroposferico::AtrasoReceptorSat(double AtrasoHidr,double AtrasoUmi)
{

//Comentários para o DOXYGEN
//!
/*brief Método que calcula o atraso troposférico na direção receptor - satélite.

*      É determinado o atraso troposférico através dos valores obtidos através
*      do arquivo fornecido pelo CPTEC e pela função de mapeamento de VMF1.

* \param AtrasoHidr      - atraso da componente hidrostática (in).
* \param AtrasoUmi      - atraso da componente úmida (in). */

    AtrasoTotalUsuario = AtrasoHidr*vmflh + AtrasoUmi*vmflw;

} //fim do membro

```