

MAURICIO IHLENFELDT SEJAS

MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL EM REDES GPS PARA O
POSICIONAMENTO ABSOLUTO DE ESTAÇÕES DE UMA FREQUÊNCIA

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientadores: Prof.^a Dr.^a Cláudia Pereira Krueger
Prof. Dr. Bernhard Heck

CURITIBA

2009

526.982
S463m

Sejas, Maurício Ihlenfeldt

Modelagem ionosférica local em redes GPS para o posicionamento absoluto de estações de uma frequência [manuscrito] / Mauricio Ihlenfeldt Sejas. - 2009.

173 f. : il. ; 30 cm.

Impresso.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2009.

“Orientadores: Profª. Drª. Cláudia Pereira Krueger e prof. Dr. Bernhard Heck”.

Bibliografia: f. 155-163.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Satélites artificiais em navegação. 3. Ionosfera. 4. Geodésia. I. Universidade Federal do Paraná. II Krueger, Cláudia Pereira. III. Heck, Bernhard. IV. Título.

Bibliotecário: Arthur Leitis Junior - CRB 9/1548

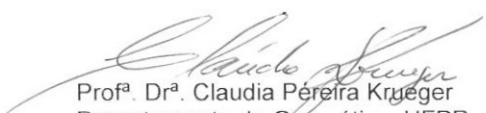
TERMO DE APROVAÇÃO

MAURÍCIO IHLENFELDT SEJAS

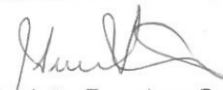
"MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL EM REDES GPS PARA O POSICIONAMENTO ABSOLUTO DE ESTAÇÕES DE UMA FREQUENCIA"

Tese nº 64 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

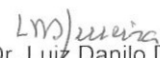
Orientadora:


Prof.ª. Dr.ª. Claudia Pereira Krüger
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Bernhard Heck
Universidade de Karlsruhe, Alemanha


Prof. Dr. João Francisco Galera Monico
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Wilson Alcântara Soares
Departamento de Física, UFPR


Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 25 de agosto de 2009.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos iniciais são para minha família e namorada, pelo apoio incondicional.

À orientadora professora Cláudia Krueger, pelas sugestões, idéias, incentivo, motivação, oportunidades, confiança e pela amizade. Ao co-orientador professor Bernhard Heck, pelo apoio na Alemanha, sugestões, confiança e motivação.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (UFPR), por disponibilizar todos os recursos necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Ao Instituto de Geodésia de Karlsruhe (GIK), da Universidade de Karlsruhe, no qual o doutorado *sandwich* se desenvolveu. Dentre os pesquisadores do Instituto que colaboraram, gostaria de agradecer especialmente ao Michael Mayer por todas as sugestões e contribuições dadas ao trabalho.

Agradeço também à todos os professores da UFPR que colaboraram, direta, ou indiretamente ao meu aprendizado, não somente nestes últimos anos, mas durante toda minha jornada na instituição.

Aos amigos do LAGE, LARAS e LAIG, da graduação e da pós-graduação.

Agradeço também ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que disponibiliza gratuitamente e sistematicamente observações GNSS, e ao IGS (*International GNSS Service*) e seus Centros de Análise, por disponibilizarem vários produtos utilizados no trabalho.

Aos colegas da Universidade Tecnológica Federal do Parana (UTFPR), *Campus* Francisco Beltrão, instituição na qual atualmente estou vinculado, pelo apoio durante a fase final do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao DAAD (*Deutscher Akademischer Austauschdienst* - Serviço de Intercâmbio Acadêmico Alemão) que por meio do programa PROBRAL permitiu o desenvolvimento da pesquisa na Alemanha. À CAPES também por disponibilizar o Portal.periódicos.CAPES, que oferece acesso à textos científicos completos para pesquisadores em universidades.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS E TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
RESUMO	xiii
ASBTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 A IONOSFERA.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 Objetivo Geral.....	7
1.3.2 Objetivos Específicos.....	7
1.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO.....	8
1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	9
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O GPS	10
2.1 SEGMENTOS GPS.....	10
2.2 SINAIS DOS SATÉLITES E MODERNIZAÇÕES DO SISTEMA.....	11
2.3 OBSERVÁVEIS GPS.....	12
2.4 ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GPS.....	15
2.4.1 Órbita e Relógio dos Satélites.....	15
2.4.2 Relatividade.....	17
2.4.3 Erro Instrumental.....	18
2.4.4 Deslocamento e Variação do Centro de Fase de Antenas.....	19
2.4.5 Fase <i>Wind-up</i>	22
2.4.6 Multicaminho.....	22
2.4.7 Refração Troposférica.....	23
2.4.8 Refração Ionosférica.....	27
2.4.9 Marés Terrestres.....	31
2.4.10 Carga Oceânica.....	32
2.4.11 Carga Atmosférica.....	34
2.4.12 Variação Temporal das Coordenadas Devido às Placas Tectônicas.....	34
2.5 COMBINAÇÕES LINEARES.....	36
2.6 PERDAS DE CICLO.....	40
2.7 SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA.....	41
2.8 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES.....	42

2.9 POSICIONAMENTO POR PONTO.....	48
2.10 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO.....	51
3 IONOSFERA.....	56
3.1 PROCESSOS DE IONIZAÇÃO.....	56
3.2 ESTRUTURA DA IONOSFERA.....	57
3.3 REGIÕES GEOGRÁFICAS DA IONOSFERA.....	59
3.4 DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS.....	61
3.4.1 Tempestades Geomagnéticas e Ionosféricas.....	61
3.4.2 Cintilação Ionosférica.....	62
3.5 ÍNDICE GEOMAGNÉTICO Kp.....	62
3.6 MODELOS IONOSFÉRICOS.....	63
3.6.1 Modelo Transmitido (<i>Broadcast</i>).....	63
3.6.2 Modelo da Camada Ionosférica.....	64
3.6.3 Funções de Modelagem do VTEC.....	66
3.6.3.1 Série de Taylor.....	66
3.6.3.2 Harmônicos Esféricos.....	67
4 MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL EM REDES GPS.....	68
4.1 DESCRIÇÃO DO MODELO.....	68
4.2 CÁLCULO DO CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS.....	69
4.3 FUNÇÃO DE MAPEAMENTO.....	72
4.4 PONTO IONOSFÉRICO.....	73
4.5 MODELO MATEMÁTICO.....	74
4.6 INTERPOLAÇÃO E CORREÇÃO DAS OBSERVAÇÕES.....	77
5 METODOLOGIA.....	79
5.1 ÁREA DE ESTUDO.....	79
5.1.1 Europa.....	79
5.1.2 Brasil.....	83
5.2 PROGRAMAS UTILIZADOS.....	87
5.2.1 Processamento PP e PPP com o Programa Bernese.....	87
5.2.2 Modelagem Ionosférica com o Programa Bernese.....	90
5.2.3 Programa de Modelagem Ionosférica Local em Rede.....	91
5.2.4 Formato NEPEX.....	94
5.3 ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE.....	96
6 RESULTADOS E ANÁLISES.....	99
6.1 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO.....	99
6.1.1 PPP com a observável livre da ionosfera (L_3).....	99
6.1.2 PPP sem correção ionosférica (L_1).....	106
6.1.3 PPP utilizando mapas globais de ionosfera ($L_1 + GIM$).....	109

6.1.4 PPP utilizando mapas regionais da ionosfera ($L_1 + RIM$).....	112
6.2 POSICIONAMENTO POR PONTO.....	118
6.2.1 PP com a observável livre da ionosfera (P_3).....	118
6.2.2 PP sem correção ionosférica (P_1 ou C/A).....	123
6.2.3 PP utilizando mapas regionais de ionosfera ($P_1 + RIM$).....	125
6.3 MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL.....	127
6.3.1 Número de Satélites Observados Simultaneamente.....	127
6.3.2 TEC Observado Versus TEC Interpolado.....	130
6.3.3 Análise dos Coeficientes de Rede.....	141
6.4 PP com modelagem ionosférica em rede (P_1 ou C/A + LTM).....	145
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	155
APÊNDICE A.....	164

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 2.1 – ÓRBITAS E RELÓGIO DOS SATÉLITES.....	17
QUADRO 2.2 – DESLOCAMENTO DO CENTRO DE FASE RELATIVO ADOTADO PELO IGS.....	21
QUADRO 2.3 – VELOCIDADES ANGULARES PARA AS PLACAS EURÁSIA E AMÉRICA DO SUL	36
QUADRO 3.1 – CLASSIFICAÇÃO DA ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA EM FUNÇÃO DO ÍNDICE K _p	63
QUADRO 5.1 – COORDENADAS DAS ESTAÇÕES IGS (ITRF2005 – ÉPOCA 2000.0).....	79
QUADRO 5.2 – COMPRIMENTO DAS LINHA DE BASE ENTRE AS ESTAÇÕES DO IGS (km).....	80
QUADRO 5.3 – INFORMAÇÕES INSTRUMENTAIS DAS ESTAÇÕES DO IGS.....	81
QUADRO 5.4 – COORDENADAS DAS ESTAÇÕES RBMC (SIRGAS2000 – ÉPOCA 2000.4).....	84
QUADRO 5.5 – COMPRIMENTO DAS LINHAS DE BASE ENTRE AS ESTAÇÕES DA RBMC (km)	84
QUADRO 5.6 – INFORMAÇÕES INSTRUMENTAIS DAS ESTAÇÕES DA RBMC.....	85
QUADRO 5.7 – PRODUTOS CODE/IGS UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS.....	90
TABELA 6.1 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO PTBB (REDE EU-A).....	131
TABELA 6.2 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO WSRT (REDE EU-A).....	132
TABELA 6.3 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO SPT0 (REDE EU-A).....	133
TABELA 6.4 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO WTZZ (REDE EU-B).....	134
TABELA 6.5 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-A).....	136
TABELA 6.6 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-B).....	137
TABELA 6.7 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-C).....	139
TABELA 6.8 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-D).....	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – RELACÃO ENTRE O ARP, CFM E VARIAÇÃO DO CENTRO DE FASE.....	20
FIGURA 2.2 – SISTEMA DE COORDENADAS FIXO AO SATÉLITE.....	21
FIGURA 2.3 – PERFIL VERTICAL DA ATMOSFERA.....	24
FIGURA 2.4 – MAPA DAS PLACAS TECTÔNICAS.....	35
FIGURA 2.5 – DISCREPÂNCIAS COM E SEM A SA ATIVADA.....	49
FIGURA 2.6 – CONVERGÊNCIA DA SOLUÇÃO PPP (ESTAÇÃO ALGO).....	54
FIGURA 3.1 – POSSÍVEIS SUBDIVISÕES DA ATMOSFERA TERRESTRE.....	56
FIGURA 3.2 – SUBDIVISÃO DA IONOSFERA.....	58
FIGURA 3.3 – DIVISÃO DA TERRA DE ACORDO COM AS REGIÕES GEOMAGNÉTICAS.....	59
FIGURA 3.4 – MODELO DE KLOBUCHAR (TRANSMITIDO).....	64
FIGURA 3.5 – MODELO DA CAMADA IONOSFÉRICA.....	65
FIGURA 4.1 – MODELO DIFERENCIAL DA IONOSFERA.....	68
FIGURA 4.2 – VTEC ESTIMADO COM E SEM SUAUIZAÇÃO DAS PSEUDODISTÂNCIAS.....	72
FIGURA 4.3 – TEC INCLINADO E VERTICAL.....	72
FIGURA 4.4 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS IONOSFÉRICOS.....	73
FIGURA 4.5 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO.....	74
FIGURA 5.1 – ESTAÇÕES EUROPEIAS DO IGS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS.....	80
FIGURA 5.2 – ÍNDICE GEOMÁGNÉTICO Kp PARA OS DIAS 258-267/2007.....	82
FIGURA 5.3 – REDES GPS FORMADAS NA EUROPA.....	83
FIGURA 5.4 – ESTAÇÕES DA RBMC EMPREGADAS NOS EXPERIMENTOS.....	84
FIGURA 5.5 – ÍNDICE GEOMÁGNÉTICO Kp PARA OS DIAS 193-202/2008.....	85
FIGURA 5.6 – REDES GPS FORMADAS NO BRASIL.....	86
FIGURA 5.7 – ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO PPP COM O PROGRAMA BERNESE.....	88
FIGURA 5.8 – MODELAGEM IONOSFÉRICA COM O PROGRAMA BERNESE.....	91
FIGURA 5.9 – ETAPAS DO PROCESSAMENTO.....	92
FIGURA 5.10 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DESENVOLVIDO.....	93
FIGURA 5.11 – EXEMPLO DE ARQUIVO NO FORMATO NEPEX.....	95
FIGURA 5.12 – ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE.....	96
FIGURA 6.1 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₃) – EUROPA.....	101
FIGURA 6.2 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₃) – BRASIL.....	103
FIGURA 6.3 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₃) – EUROPA.....	104
FIGURA 6.4 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₃) – BRASIL.....	105
FIGURA 6.5 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₁) – EUROPA.....	107
FIGURA 6.6 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₁) – BRASIL.....	108
FIGURA 6.7 – MAPAS GLOBAIS DE IONOSFERA VTEC/RMS (CODE).....	109
FIGURA 6.8 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₁ +GIM) – EUROPA.....	110
FIGURA 6.9 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₁ +GIM) – BRASIL.....	111

FIGURA 6.10 – TRECHO DE UM ARQUIVO CONTENDO PARÂMETROS IONOSFÉRICOS.....	112
FIGURA 6.11 – TECHO DE UM ARQUIVO NO FORMATO IONEX.....	113
FIGURA 6.12 – MAPAS REGIONAIS DE IONOSFERA VTEC/RMS – EUROPA.....	114
FIGURA 6.13 – MAPAS REGIONAIS DE IONOSFERA VTEC/RMS – BRASIL.....	115
FIGURA 6.14 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₁ +RIM) – EUROPA.....	116
FIGURA 6.15 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L ₁ +RIM) – BRASIL.....	117
FIGURA 6.16 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₃) – EUROPA.....	119
FIGURA 6.17 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₃) – BRASIL.....	120
FIGURA 6.18 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₃) – EUROPA.....	121
FIGURA 6.19 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₃) – BRASIL.....	122
FIGURA 6.20 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₁) – EUROPA.....	123
FIGURA 6.21 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (C/A) – BRASIL.....	124
FIGURA 6.22 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₁ +RIM) – EUROPA.....	125
FIGURA 6.23 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (C/A+RIM) – BRASIL.....	126
FIGURA 6.24 – SATÉLITES OBSERVADOS NAS REDES EUROPÉIAS (DIA 258/2007).....	128
FIGURA 6.25 – SATÉLITES OBSERVADOS NA REDE EU-A (DIAS 262 E 267/2007).....	128
FIGURA 6.26 – SATÉLITES OBSERVADOS NAS REDES GPS BRASILEIRAS (DIA 194/2008).....	129
FIGURA 6.27 – SATÉLITES OBSERVADOS NA REDE BR-A (DIAS 196 E 200/2008).....	130
FIGURA 6.28 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO PTBB (REDE EU-A).....	131
FIGURA 6.29 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO WSRT (REDE EU-A).....	132
FIGURA 6.30 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO SPT0 (REDE EU-A).....	133
FIGURA 6.31 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO WTZZ (REDE EU-B).....	134
FIGURA 6.32 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-A).....	136
FIGURA 6.33 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-B).....	138
FIGURA 6.34 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-C).....	139
FIGURA 6.35 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-D).....	141
FIGURA 6.36 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA SUPERFÍCIE LINEAR	142
FIGURA 6.37 – VARIAÇÃO TEMPORAL DOS COEFICIENTES DE REDE (REDE EU-A E EU-B) .	143
FIGURA 6.38 – VARIAÇÃO TEMPORAL DOS COEFICIENTES DE REDE (REDE BR-B).....	144
FIGURA 6.39 – VARIAÇÃO TEMPORAL DOS COEFICIENTES DE REDE (REDE BR-D).....	145
FIGURA 6.40 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P ₁ +LTM) – EUROPA.....	146
FIGURA 6.41 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (C/A+LTM) – BRASIL.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

al.	– alemão
AC	– ingl. <i>Analysis Center</i>
ACC	– ingl. <i>Analysis Center Coordinator</i>
AIUB	– al. <i>Astronomisches Institut Universität Bern</i>
ARP	– ingl. <i>Antenna Reference Point</i>
ASCII	– ingl. <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BPE	– ingl. <i>Bernese Processing Engine</i>
C/A	– ingl. <i>Coarse Acquisition-code</i>
CAPES	– Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	– Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CODE	– ingl. <i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
CSRS	– ingl. <i>Canadian Spatial Reference System</i>
CPGCG	– Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
DCB	– ingl. <i>Differential Code Biases</i>
DGPS	– ingl. <i>Differential Global Positioning System</i>
EGNOS	– ingl. <i>European Geostationary Navigation Overlay System</i>
ESOC	– ingl. <i>European Space Operations Center of ESA</i>
FCT/UNESP	– Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista
GAGAN	– ingl. <i>GPS & GEO Augmented Navigation</i>
GAPS	– ingl. <i>GPS Analysis and Positioning Software</i>
GIK	– al. <i>Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)</i>
GIM	– ingl. <i>Global Ionospheric Map</i>
GIPSY-OASIS	– ingl. <i>GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software</i>
GLONASS	– ingl. <i>Global Orbiting Navigation Satellite System</i>
GNSS	– ingl. <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	– ingl. <i>Global Positioning System</i>
GSI	– ingl. <i>Geographic Survey Institute</i>
HL	– Hora Legal
HSSWS	– ingl. <i>High Speed Solar Wind Stream</i>
IAAC	– ingl. <i>Ionosphere Associate Analysis Center</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	– ingl. <i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGDG	– ingl. <i>Internet-based Global Differential GPS</i>
IGS	– ingl. <i>International GNSS Service</i>
INCRA	– Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
ingl.	– inglês
IONEX	– ingl. <i>Ionosphere Map Exchange Format</i>

IPP	– ingl. <i>Ionospheric Pierce Point</i>
ITRF	– ingl. <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JPL	– ingl. <i>Jet Propulsion Laboratory</i>
Kp	– al. <i>Planetarische Kennziffer (Planetary Index)</i>
LAGE	– Laboratório de Geodésia Espacial
LPIM	– ingl. <i>La Plata Ionospheric Model</i>
LTM	– ingl. <i>Local TEC Model</i>
MINQUE	– ingl. <i>Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimator</i>
MSAS	– ingl. <i>MTSAT (Multifunctional Transport Satellite) Based Augmentation System</i>
NAVSTAR	– ingl. <i>Navigation System with Time And Ranging</i>
NEPEX	– ingl. <i>Network Parameters Exchange Format</i>
NNR-NUVELL	– ingl. <i>No Net Rotation-Northern University Velocity Model</i>
NRCan	– ingl. <i>Natural Resources Canada</i>
NWP	– ingl. <i>Numerical Weather Prediction</i>
P	– ingl. <i>Precise-code</i>
PCF	– ingl. <i>Process Control File</i>
PCO	– ingl. <i>Phase Center Offset</i>
PCV	– ingl. <i>Phase Center Variation</i>
PP	– ingl. <i>Point Positioning</i>
PPP	– ingl. <i>Precise Point Positioning</i>
PRN	– ingl. <i>Pseudorandom Noise</i>
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RIBaC	– Rede INCRA de Bases Comunitárias do GPS
RIM	– ingl. <i>Regional Ionospheric Map</i>
RINEX	– ingl. <i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMS	– ingl. <i>Root Mean Square Error</i>
RTK	– ingl. <i>Real Time Kinematic</i>
SA	– ingl. <i>Selective Availability</i>
SBAS	– ingl. <i>Space-Based Augmentation System</i>
SDF	– ingl. <i>Sudden Disappearing Filaments</i>
SINEX	– ingl. <i>Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format</i>
SIRGAS	– Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLM	– ingl. <i>Single Layer Model</i>
SNR	– ingl. <i>Signal to Noise Ratio</i>
SPP	– ingl. <i>Single Point Positioning</i>
SP3	– ingl. <i>Standard Product 3</i>
SV	– ingl. <i>Space Vehicle</i>
SVN	– ingl. <i>Space Vehicle Number</i>
TEC	– ingl. <i>Total Electron Content</i>

TECU	– ingl. <i>Total Electron Content Unit</i>
TUC	– Tempo Universal Coodenado (ingl. <i>Universal Time Coordinated</i> – UTC)
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
UEV	– Extremo Ultra-violeta
UNB	– ingl. <i>University of New Brunswick</i>
UPC	– ingl. <i>Technical University of Catalonia</i>
VTEC	– ingl. <i>Vertical Total Electron Content</i>
WAAS	– ingl. <i>Wide Area Augmentation System</i>

RESUMO

Uma alternativa para o posicionamento geodésico em países de dimensões como as do Brasil é o posicionamento por ponto preciso pelo fato dele depender de linhas de base. A acurácia alcançada por ele pode ser da ordem de decímetros a centímetros, porém, observa-se a necessidade do usuário utilizar um receptor de dupla-frequência. Essa exigência decorre da necessidade em reduzir o efeito da refração ionosférica por meio da combinação linear livre da ionosfera. Outra possibilidade para reduzir esse erro sobre as observações GPS é o emprego de modelos ou de mapas regionais/globais da ionosfera. Neste estudo foi proposto um modelo local de ionosfera que utiliza uma rede de estações de referência com receptores de dupla frequência. O modelo estima coeficientes independentes para cada um dos satélites em cada época. Parte-se do princípio que os erros para cada satélite apresentam um comportamento aproximadamente linear na região coberta pela rede, assim, um modelo matemático simples é utilizado para descrever o erro. Além disso, coeficientes são gerados a cada época permitindo monitorar rápidas variações do conteúdo total de elétrons. Experimentos foram conduzidos em regiões com condições ionosféricas diversas: a primeira na Europa Central, em latitudes médias, e a segunda no Sul do Brasil, na região equatorial. O modelo proposto foi testado por meio do posicionamento por ponto, que emprega somente observações de código, onde foram utilizados produtos precisos (órbita e relógio) e foi gerada uma única solução envolvendo todas as épocas de observação. Uma série de processamentos foi realizada em estações que operam receptores de dupla frequência, onde foram adotadas as seguintes estratégias: a) empregando a combinação livre da ionosfera do código; b) código na frequência L_1 sem qualquer correção ionosférica; c) código na frequência L_1 com mapas regionais da ionosfera; d) código na frequência L_1 com o modelo ionosférico proposto. Os melhores resultados foram obtidos quando se empregou a combinação linear livre da ionosfera. Como esperado, o processamento sem levar em conta qualquer correção ionosférica apresentou discrepâncias da ordem de alguns metros, especialmente para a componente altimétrica. O processamento com mapas regionais da ionosfera mostraram altas discrepâncias para as componentes planimétricas. O processamento com o modelo proposto mostrou discrepâncias menores que o metro para todas as estações testadas com desvios-padrão de até 0,60 m, mostrando valores comparáveis aos obtidos com a combinação livre da ionosfera. Os resultados obtidos da modelagem ionosférica desenvolvida mostram que as correções geradas conseguiram eliminar 92% do efeito da ionosfera para as estações europeias e 87% para as brasileiras, em média, quando comparadas com as correções geradas pela própria estação empregando a mesma observável (código).

Palavras Chave: GPS, Ionosfera, TEC

ABSTRACT

One alternative for geodetic positioning in countries as big as Brazil is the precise point positioning due to its independence concerning baselines. The accuracy reached by this method can reach decimeters or centimeters, however one can see the need for using double-frequency receivers. Double-frequency observations can be used in an ionosphere-free linear combination to reduce the ionospheric refraction. Other possibilities for reducing this error source in GPS observations are ionospheric models or global/regional ionospheric maps. This study an ionospheric local model was proposed. It uses a network of double-frequency receivers and estimates independent coefficients for each satellite at each epoch. It is assumed that the errors for each satellite are approximately linear in an area covered by the network, then a simple model is used to describe the error. As network coefficients are generated for each epoch, quick changes in the total electron content can be monitored. Experiments were carried out in regions with different ionospheric conditions: the first in Central Europe, in mid latitudes, and the second one in South Brazil, in the equatorial region. The developed model was tested using the point positioning method, that works with code observations only, and precise products (orbits and clocks) are taken into account. Just one solution is obtained considering observations of all epochs. Several data processing procedures were performed using double-frequency stations, and the processing strategies were: a) using the code ionosphere-free linear combination; b) code at L_1 frequency without any ionospheric correction; c) code at L_1 frequency and regional ionospheric maps; d) code at L_1 frequency and corrections from the proposed model. The best solutions were obtained when the ionosphere-free linear combination was used. As expected, positioning without any ionospheric corrections showed discrepancies of some meters, mainly in the height component. Data processing using regional ionospheric maps provided solutions with high discrepancies for planimetric components. Results from processing with the developed model showed discrepancies smaller than one meter for all tested stations, and the standard deviations were smaller than 0,60 m. The results are comparable with the results from the ionosphere-free linear combination strategy. The results showed that the model removed 92% of all ionospheric effect for European stations and 87% for Brazilian stations, on average, when comparing with corrections generated for the own station and using the same observable (code).

Keywords: GPS, Ionosphere, TEC

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo Seeber (2003, p. 211), o princípio fundamental da navegação por satélites consiste na medida das pseudodistâncias entre um receptor e quatro satélites. Partindo-se do princípio que as coordenadas dos satélites são conhecidas em um sistema de referência adequado, as coordenadas do receptor podem ser determinadas. Geometricamente três medidas seriam suficientes, porém, uma quarta medida é necessária devido ao não sincronismo do relógio do receptor com o relógio do satélite.

No contexto deste trabalho, o posicionamento absoluto trata daquele onde se empregam observações não diferenciadas, isto é, as observáveis originais de um único receptor GPS (ingl. *Global Positioning System*). Desta forma, o método de posicionamento absoluto engloba tanto o posicionamento por ponto (ingl. *Point Positioning* – PP) quanto o posicionamento por ponto preciso (ingl. *Precise Point Positioning* – PPP).

O termo *posicionamento por ponto* é historicamente atribuído à determinação de parâmetros, utilizando as pseudodistâncias, e fixando os parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação. A qualidade dos resultados é limitada devido ao ruído inerente à pseudodistância do código e pelo fato das informações de órbita e relógios transmitidos apresentarem erros da ordem de alguns metros (ZUMBERGE *et al.*, 1997, p. 5008). Na literatura, encontram-se também outros termos, como *posicionamento por ponto simples* (ingl. *Single Point Positioning* – SPP) (GAO e WOJCIECHOWSKI, 2004) e *posicionamento por ponto convencional* (MONICO, 2000a, p. 184).

Devido às limitações de acurácia proporcionadas pelo posicionamento absoluto, métodos de posicionamento relativos foram introduzidos. Nestes, observações simultâneas devem ser coletadas por receptores em pelo menos duas estações, sendo uma de coordenadas conhecidas, neste trabalho denominada estação base ou de referência. Normalmente, duplas diferenças de fase são formadas entre dois receptores e dois satélites, e de acordo com Seeber (2003,

p. 261), elas são as observáveis básicas em muitos modelos de ajustamento empregados no GPS. Leick (1995, p. 261) afirma que o aspecto mais importante destas observáveis é o cancelamento dos maiores erros referentes aos relógios dos receptores e dos satélites. Outro papel importante dessa observável é que as ambiguidades das duplas diferenças de fase podem ser arredondadas para números inteiros, segundo determinados critérios.

Algumas aplicações, no entanto, necessitam ser executadas em tempo real. Na metade da década de 90 o posicionamento denominado RTK (ingl. *Real-Time Kinematik*) foi desenvolvido. Nele, um receptor ocupa uma estação de referência e observa a pseudodistância e a fase da onda portadora, as quais são transmitidas via um *link* de rádio para uma ou mais estações em campo. Estas estações combinam suas observações com aquelas recebidas pelo rádio, resolve as ambiguidades da fase e determina suas coordenadas com alta acurácia (LANGLEY, 2007). Seeber (2003, p. 336) observa que correções geradas na estação de referência podem ser transmitidas ao invés das observações. Segundo Wanninger (2006), uma considerável limitação do posicionamento RTK é a distância máxima entre as estações de referência e aquela que se deseja posicionar, pois para que seja possível a resolução rápida e confiável das ambiguidades esta distância não deve ultrapassar 10-20 km. Wübbena *et al.* (2001) destaca que essa limitação ocorre devido aos erros dependentes de distância e de estação.

Para Wübbena e Willgalis (2001), redes de estações de referência permanentes estão sendo instaladas em muitos países com o objetivo de contornar as limitações dos sistemas RTK tradicionais. Segundo Wanninger (1997), as observações de várias estações de referência em redes regionais permitem a modelagem dos erros correlacionados espacialmente, como: troposfera, ionosfera e órbita.

Apesar do método de posicionamento relativo dominar o campo de processamento de dados desde o início do GPS, King *et al.* (2002) observam que esta situação mudou no início dos anos 90, quando o posicionamento por ponto preciso surgiu e a acurácia esperada por ele era comparável à obtida pelos métodos relativos. A disponibilidade de coordenadas e erro do relógio dos satélites com mais precisão permitiu o desenvolvimento dessa nova técnica. Ela é baseada no processamento de observações não diferenciais (não relativas) do código e fase da onda portadora. Ela elimina as limitações de interdependência entre estações

impostas pelo posicionamento relativo devido ao fato de não precisar de uma estação base (GAO e CHEN, 2004).

Um dos trabalhos relacionados com PPP de maior impacto na comunidade científica foi apresentado por Zumberge *et al.* (1997), onde os autores empregaram um conjunto de estações GPS para estimar parâmetros de órbita e relógio dos satélites precisos, os quais foram utilizados no processamento, obtendo-se coordenadas geodésicas com precisão ao nível do centímetro. A performance do PPP tem sido demonstrada ao longo dos últimos anos por diversos autores, como: Witchayangkoon (2000), Monico (2000a), Kouba e Héroux (2001), Shen e Gao (2002), Gao e Chen (2004), Faustino (2006), entre outros. Segundo Gao e Chen (2004), o impacto do PPP no posicionamento deve ser significativo, não somente pela técnica trazer grande flexibilidade nas operações de campo, mas também pela redução dos custos de mão de obra e equipamentos em face de eliminar a necessidade de estações base.

Kouba (2003) afirma que algoritmos para o posicionamento por ponto preciso baseados em observações de fase não diferenciadas tem sido implementados em programas como o GIPSY-OASIS II (ingl. *GPS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software*) (GREGORIUS, 1996) e mais recentemente no programa Bernese (DACH *et al.*, 2007). Atualmente, existem alguns serviços para processamento PPP pela *internet*, como: CSRS-PPP do NRCan (ingl. *Natural Resources Canada*) (NRCan, 2009), GAPS (ingl. *GPS Analysis and Positioning Software*) da Universidade de New Brunswick (LEANDRO *et al.*, 2007), APPS (ingl. *Automatic Precise Positioning Service*) do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) (JPL, 2009b), entre outros. Recentemente, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) disponibilizou em seu sítio na *internet* um serviço PPP, denominado IBGE-PPP, fazendo uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP.

Com a integração da Rede INCRA de Bases Comunitárias do GPS (RIBaC), mantida pelo INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), gerenciada pelo IBGE, uma série de estações GNSS de dupla frequência devem ser implantadas no Brasil. Atualmente, já se encontram mais de 50 estações operando. Mesmo com a instalação de novas estações, em muitos casos as distâncias entre elas são superiores a 250 km. O posicionamento geodésico preciso, no entanto, exige que as ambiguidades sejam resolvidas em seus inteiros corretamente, e para linhas de

base com esse comprimento a obtenção de uma solução confiável pode ser comprometida. Pensando em aplicações em tempo real, as dificuldades são ainda maiores, pois as ambiguidades devem ser resolvidas em tempo real. Sendo o Brasil um país de grande extensão territorial, torna-se praticamente inviável densificar a rede de forma que as linhas de base sejam próximas do comprimento necessário esperado para a resolução das ambiguidades, pois se sabe que os custos envolvidos na instalação e manutenção de redes ativas é alto.

Uma solução para o problema de posicionamento geodésico em países de dimensões como as do Brasil é o posicionamento por ponto preciso pelo fato dele ser independente de linhas de base. A acurácia alcançada pode ser da ordem de decímetros a centímetros (GAO e CHEN, 2004; KOUBA e HÉROUX, 2001; MONICO, 2000b), quando empregado em levantamentos estáticos no modo pós-processado. Desta forma, nota-se que este método concorre com os métodos tradicionais de posicionamento relativo que utilizam as duplas diferenças de fase no processamento.

Dentre as desvantagens da técnica, observa-se o tempo para a convergência da solução, pelo menos 20 minutos para a solução da ordem do centímetro (GAO e CHEN, 2004), e a necessidade de se utilizar um receptor de dupla frequência (de custo mais elevado que os de uma frequência). Essa exigência decorre da necessidade em reduzir o efeito da refração ionosférica, por meio de uma combinação entre observáveis nas diferentes frequências.

1.2 A IONOSFERA

Atualmente, a ionosfera é a maior fonte de erro no posicionamento GPS. A necessidade de utilizar receptores GPS de dupla frequência, com o objetivo de cancelar os maiores efeitos devido à refração ionosférica, restringe o número de usuários, principalmente devido ao custo destes equipamentos.

Outra possibilidade para reduzir o efeito da ionosfera sobre as observações GPS é o emprego de modelos ionosféricos. Um dos modelos mais versáteis é o modelo de Klobuchar, desenvolvido por Klobuchar (1987), também conhecido como modelo transmitido (ingl. *broadcast*). Sabe-se que o erro ionosférico é diretamente

proporcional ao conteúdo total de elétrons (ingl. *Total Electron Content – TEC*) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Klobuchar (1996, p. 508) propõe uma função cosseno para representar as variações diurnas do TEC a serem empregadas por receptores de uma frequência. Este modelo apresenta oito coeficientes, os quais são transmitidos pelas mensagens de navegação, e segundo Leick (2004, p. 220), ele consegue estimar somente algo em torno de 50-60% do atraso ionosférico.

Vários centros de pesquisa desenvolvem mapas de ionosfera que contêm valores de TEC para uma grade de pontos. Na Europa, o CODE (ingl. *Center for Orbit Determination in Europe*) emprega harmônicos esféricos para descrever a ionosfera regionalmente (para a Europa) e globalmente, além de produzir mapas preditos. Na América do Sul, a Faculdade de Ciências Astronômicas e Geofísicas da Universidade Nacional de La Plata (Argentina) desenvolveu um modelo global de ionosfera denominado LPIM (ingl. *La Plata Ionospheric Model*). Ele é baseado em harmônicos esféricos, e enquanto outros modelos utilizam o sistema de coordenadas geomagnético, o LPIM emprega um sistema de coordenadas que utiliza uma latitude modificada (AZPILICUETA *et al.* 2006). O LPIM é gerado com uma resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ (em latitude e longitude) e temporal de 1 hora

Segundo Pajares (2003), o grupo de trabalho da ionosfera (ingl. *Ionosphere Working Group*) iniciou a geração sistemática de mapas de TEC a partir de 1998. Inicialmente, o grupo contava com cinco IAACs (ingl. *IGS Ionosphere Associate Analysis Centers*), sendo eles: CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*, Instituto Astronômico, Universidade de Berna, Suíça), ESOC (*European Space Operations Center of ESA*, Darmstadt, Alemanha), JPL (*Jet Propulsion Laboratory*, Pasadena, California, Estados Unidos), NRCan/EMR (*Natural Resources Canada*, Ottawa, Ontário, Canadá) e a UPC (*Technical University of Catalonia*, Barcelona, Espanha). Verifica-se que atualmente a instituição canadense não participa na geração dos mapas.

Cada IAAC utiliza uma estratégia para o cálculo dos mapas, que combinadas geram os chamados *produtos combinados*. Mas todas as soluções individuais são geradas com a mesma resolução espacial: $5^\circ \times 2,5^\circ$ (em longitude e latitude), e mesma resolução temporal: 2 horas (PAJARES, 2003). O número de estações GPS/GNSS varia de instituição para instituição, sendo que os mapas do CODE, por exemplo, empregam aproximadamente 150 estações do IGS (ingl.

International GNSS Service) e de outras instituições também, distribuídas pelos seis continentes.

No Brasil, observa-se o crescente interesse de pesquisadores no sentido de estimar o efeito da refração ionosférica e estudar o seu comportamento. Uma sequência de estudos vem sendo desenvolvida pelo Departamento de Cartografia da FCT/UNESP ao longo dos anos. Camargo (1999) desenvolveu o modelo regional de ionosfera (Mod_Ion), analiticamente representado pela Série de Fourier, e que utiliza um conjunto de estações GPS de dupla frequência. Os experimentos foram realizados para o posicionamento por ponto e relativo, mostrando que o modelo conseguiu remover algo em torno de 80% e 41% do efeito ionosférico, respectivamente. Matsuoka (2003) implementou outros modelos no Mod_Ion, como Série de Taylor, Harmônicos Esféricos e um polinômio de quarta ordem, além de diferentes funções de mapeamento. Aguiar (2005) introduziu o Filtro de Kalman (Mod_Ion_FK) permitindo a modelagem em tempo real. Os resultados mostraram uma significativa melhora no posicionamento por ponto, chegando a corrigir 90% do efeito ionosférico. Recentemente Matsuoka (2007) apresentou uma pesquisa que teve como principal objetivo estudar o comportamento da ionosfera na região brasileira em diferentes condições ionosféricas, além de avaliar a performance e as limitações dos mapas globais de ionosfera, desenvolvidos pelo IGS, aplicados no posicionamento por ponto no Brasil. Aguiar (2009) está estudando métodos de interpolação para a geração das grades e verificando a resolução espacial e temporal adequada para uma grade ionosférica no Brasil e na América do Sul, além de processos de controle de qualidade para as estimativas de VTEC em tempo real.

Verifica-se que pesquisadores de outras instituições também estão atuando nessa área, como Fonseca Junior (2002) que empregou um programa científico para a criação de uma série histórica do comportamento da refração ionosférica, abrangendo um intervalo de tempo que contemplava períodos de ciclo solar com máxima e mínima atividade. Veronez (2004) desenvolveu um método para modelar o atraso ionosférico por meio de um polinômio de segundo grau, baseado no ajustamento sequencial de observações. Fedrizzi (1999) estudou a variação diurna, latitudinal e sazonal do TEC estimado pelo IGS na região sul americana e da Península Antártica, comparando com modelos empíricos de ionosfera.

Apesar dos esforços de várias pesquisadores no sentido de gerar produtos mais precisos, observa-se que algumas questões merecem maior atenção. A

Europa, localizada em uma região ionosférica de latitudes médias, apresenta grande concentração de estações GPS/GNSS, portanto maior número de estações participam no processo de modelagem ionosférica. Na América do Sul, especialmente a região Sul do Brasil, localizada em uma região onde se observa alta atividade ionosférica, tem-se um número de estações GPS/GNSS consideravelmente inferior. Esta situação contribui para que a precisão dos mapas globais de ionosfera gerados para esta região não sejam tão precisos como de outras. Além do mais, observa-se que a resolução espacial e temporal destes mapas também são fatores que interferem na qualidade do posicionamento.

Devido a estas considerações, julga-se necessário a investigação de uma outra proposta que considere a necessidade de se gerar correções ionosféricas, com melhor resolução espacial e temporal, visando o posicionamento por ponto de uma estação de uma frequência.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo ionosférico local, empregando dados de estações GPS, avaliando a performance do posicionamento por ponto (PP) em estações com receptores de uma frequência.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral, seguem os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar o resultado do posicionamento por ponto (PP) e posicionamento por ponto preciso (PPP) empregando em uma primeira etapa a combinação linear livre de ionosfera e em uma segunda sem qualquer correção ionosférica;

- b) Aplicar mapas globais de ionosfera, gerados por outras instituições, no posicionamento PPP;
- c) Gerar mapas regionais de ionosfera empregando um conjunto de estações de referência, e aplicar estes mapas nos processamentos PP e PPP e analisar os resultados;
- d) Avaliar a qualidade do modelo ionosférico local desenvolvido;
- e) Desenvolver uma forma de armazenar as correções ionosféricas geradas;
- f) Comparar os resultados do posicionamento PP, que empregou as correções ionosféricas locais geradas em rede, com os resultados obtidos no item a).

1.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A maior contribuição do trabalho está em propor uma metodologia para correção do erro devido à refração ionosférica em estações que operam receptores de uma frequência. Essa metodologia compreende na utilização da atual configuração da RBMC (com estações distantes entre 250 e 450 km na região de estudo) para gerar correções ionosféricas locais, empregando para isso observações de dupla frequência do código suavizado pela fase da onda portadora. Como estas correções são geradas independentemente para cada satélite, parte-se do princípio que o erro é aproximadamente linear na rede, assim, um modelo matemático simples é empregado na modelagem. Além disso, as correções são geradas em cada época de observação (15 segundos) permitindo que rápidas variações de TEC sejam monitoradas e levadas em consideração.

As contribuições mais específicas do trabalho consistem em avaliar os resultados do posicionamento por ponto e do posicionamento por ponto preciso quando o efeito devido à ionosfera é tratado de diferentes maneiras.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRATALHO

O trabalho está organizado em sete capítulos. O segundo é uma revisão geral sobre o GPS, onde são apresentadas as observáveis básicas e as fontes de erro que atuam no sistema, principalmente aquelas que são canceladas ou reduzidas no posicionamento relativo, mas que para o posicionamento por ponto preciso devem ser consideradas. Dentre estes erros, aquele devido à ionosfera será tratado com maiores detalhes no capítulo 3, visto que se trata do erro a ser modelado neste trabalho. Segue também uma breve descrição do posicionamento por ponto, que emprega observações de código, e o posicionamento por ponto preciso, que emprega além das observações de código observações da fase da onda portadora e produtos precisos, como órbitas e relógios.

O terceiro capítulo trata de alguns aspectos gerais da ionosfera, como a sua estrutura, regiões geográficas da ionosfera, distúrbios, índices geomagnéticos e modelos ionosféricos.

No quarto capítulo é apresentada uma descrição do modelo ionosférico proposto, que envolve o modelo matemático utilizado, as observáveis empregadas para obtenção do TEC, estimativa dos parâmetros do modelo que descreve o erro na rede, interpolação e correção das observações.

A metodologia desenvolvida, envolvendo a área de estudo, período, estações envolvidas, os programas de processamento empregados e desenvolvidos, além das estratégias de análises a serem seguidas são apresentadas no quinto capítulo.

O sexto capítulo mostra os resultados alcançados na pesquisa, segundo as estratégias propostas no capítulo anterior. São feitas análises e discussões pertinentes aos resultados obtidos.

As conclusões e as considerações finais, bem como as recomendações para trabalhos futuros são indicadas no sétimo e último capítulo.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O GPS

Atualmente, existem alguns sistemas globais de posicionamento operando ou sendo desenvolvidos, como: o norte americano NAVSTAR-GPS (ingl. *Navigation Satellite with Time And Ranging*), o russo GLONASS (ingl. *Global Orbiting Navigation Satellite System*) e o europeu GALILEO (GREWAL *et al.*, 2007, p. 2). A esse conjunto de sistemas se deu o nome de GNSS (ingl. *Global Navigation Satellite System*). Monico (2008, p. 37) lembra que além dos sistemas mencionados, o sistema chinês denominado *Beidou* (ou COMPASS), poderá gradativamente se tornar um sistema global.

Além dos sistemas globais citados anteriormente, existem os denominados SBASs (ingl. *Space-Based Augmentation Systems*) sendo desenvolvidas, como: o norte americano WAAS (ingl. *Wide Area Augmentation System*), o europeu EGNOS (ingl. *European Geostacionary Navigation Overlay System*), o japonês MSAS (ingl. *Multifunctional Transport Satellite Based Augmentation System*), o indiano GAGAN (ingl. *GPS And GEO Augmented Navigation*), entre outros.

Como este trabalho empregou exclusivamente o NAVSTAR-GPS, ou simplesmente GPS, não serão abordados os demais sistemas de posicionamento globais. Na sequência segue uma breve descrição deste sistema.

2.1 SEGMENTOS GPS

O GPS normalmente é descrito por três segmentos: o espacial, o de controle e o de usuário.

O segmento espacial consiste na constelação de satélites que transmitem os sinais. Segundo Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001, p. 12), os satélites GPS têm uma órbita quase circular a uma altitude de aproximadamente 20.200 km, com período orbital de 12 horas siderais. A constelação básica consiste em 24 satélites distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com uma inclinação de 55°, com quatro satélites em cada plano. Devido a essa configuração o segmento

espacial é capaz de fornecer cobertura global de pelo menos quatro satélites a qualquer hora do dia aos usuário do sistema.

O segmento de controle consiste na estação de controle principal e uma série de estações de monitoramento distribuídas ao redor do mundo, além de antenas terrestres para enviar dados aos satélites. Dentre as principais tarefas do segmento de controle, cita-se: monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites, determinar o sistema de tempo GPS, realizar a predição da órbita e do relógio, atualizar periodicamente das mensagens de navegação e comandar pequenas manobras quando necessário (SEEBER, 2003, p. 217).

O segmento de usuários, por sua vez, é composto pelos usuários, tanto civis quanto militares, e pelos receptores GPS.

2.2 SINAIS DOS SATÉLITES E MODERNIZAÇÕES DO SISTEMA

A principal tarefa dos satélites GPS consiste em enviar sinais com informações de navegação e identificação, os quais serão decodificados pelos receptores GPS (KRUEGER, 1996, p. 9).

Os satélites GPS transmitem sinais em duas frequências, também denominadas portadoras, pertencentes à banda L, sendo: L_1 (1.575,42 MHz) e L_2 (1.227,60 MHz). Elas são obtidas a partir da multiplicação de uma frequência fundamental ($f_0 = 10,23$ MHz) por 154 e 120, respectivamente. Sobre estas portadoras são modulados em fase os códigos C/A (ingl. *Coarse Acquisition*), disponível para todos os usuários, e o código P (*Precise*), sobre o qual é criptografado o código secreto Y, além das mensagens de navegação, moduladas sobre ambas as portadoras. O código P original é disponível apenas a militares e usuários autorizados (LEICK, 2004, p. 75-76; MONICO, 2008, p. 43-46; SEEBER, 2003, p. 218-222).

O código C/A é modulado apenas sobre a portadora L_1 , enquanto que o código P sobre as duas portadoras. O código C/A tem um comprimento de onda em torno de 300 m e é transmitido com uma frequência de 1,023 MHz, enquanto que o código P, com um comprimento de onda de 30 m, é transmitido a 10,23 MHz. De

acordo com MONICO (2000a, p. 27), o fato do código P ser modulado numa razão mais alta faz com que o mesmo seja mais preciso.

A modernização do sistema GPS consiste na implantação de um novo código civil, denominado L_2C , modulado sobre a portadora L_2 . Leick (2004, p. 83) afirma que dentre as melhorias introduzidas por este código, está a redução do ruído e aumento da acurácia, bem como a melhora do posicionamento dentro de construções ou em áreas de florestas. Também implementa uma nova frequência civil, denominada L_5 (1.176,45 MHz), produto da frequência fundamental f_0 por 115, onde deverá ser modulado um código civil. Ao mesmo tempo dois novos códigos militares (M) serão adicionados em L_1 e L_2 , que segundo Leick (2004, p. 83), estarão espectralmente separados dos códigos civis. Não é planejado um código militar na portadora L_5 . Seeber (2003, p. 231) comenta que a disponibilidade de três sinais civis ajudará no que se refere à ionosfera e facilitar a resolução das ambiguidades.

No dia 24 de março de 2009 foi lançado o satélite SVN 49 (ingl. *Space Vehicle Number*), com a identificação PRN 01 (ingl. *Pseudorandom Noise*), carregando um equipamento teste que opera com a frequência L_5 . A transmissão se iniciou no dia 10 de abril, o que fez com que este se tornasse o primeiro satélite a transmitir, além da L_1 e L_2 , uma terceira frequência (SPRINGER e DILSSNER, 2009; LANGLEY, 2009).

2.3 OBSERVÁVEIS GPS

A pseudodistância e a fase da onda portadora são as observáveis mais importantes no posicionamento GPS. As soluções podem empregar somente observações de código, somente observações de fase ou ambas (LEICK, 2004, p. 170)

A medida do código é realizada por um processo conhecido como correlação do código. Monico (2008, p. 62) esclarece que neste processo uma portadora de referência é gerada no receptor, que então é modulada com uma replica do código PRN conhecido. Posteriormente, o sinal resultante é correlacionado com o sinal recebido do satélite e então os sinais são deslocados até que seja obtida a máxima

correlação. O deslocamento do tempo entre estas duas sequências de códigos é a medida do intervalo de tempo do deslocamento do sinal do satélite até o receptor.

O produto da velocidade da luz no vácuo pelo intervalo de tempo, resultante do processo de correlação, é denominado de pseudodistância. Para Monico (2000, p. 116) essa observável é denominada pseudodistância, em vez de distância, em razão principalmente do não-sincronismo entre os relógios responsáveis pela geração do código no satélite e a sua réplica no receptor.

Se além do erro de não sincronismo entre os relógios de satélite e do receptor, forem levados em consideração erros de órbita, refração troposférica e ionosférica, multicaminho e outros erros, a equação completa para a pseudodistância pode ser dada pela equação (LIU, 2004, p. 54):

$$P_{r,1}^j = \rho_r^j + c(\delta t_r - \delta t^j) + O^j + T_r^j + I_{r,1}^j + B_{r,1} + B_1^j + M_{r,1}^j + \varepsilon_{r,P} \quad (2.1)$$

$$P_{r,2}^j = \rho_r^j + c(\delta t_r - \delta t^j) + O^j + T_r^j + \gamma I_{r,1}^j + B_{r,2} + B_2^j + M_{r,2}^j + \varepsilon_{r,P_2} \quad (2.2)$$

onde:

$P_{r,1}^j, P_{r,2}^j$: pseudodistância do código P medido entre o satélite j e a estação r nas frequências L_1 e L_2 [m];

ρ_r^j : distância geométrica entre o satélite j , no tempo de transmissão do sinal, e o receptor r , no tempo de recepção do sinal, onde o tempo de propagação do sinal e o movimento de rotação da Terra devem ser considerados [m];

c : velocidade da luz no vácuo: 299.792.458 m/s;

δt_r : erro de não sincronismo do relógio da estação com o tempo GPS [s];

δt^j : erro de não sincronismo do relógio do satélite com o tempo GPS [s];

O^j : erro orbital [m];

T_r^j : refração troposférica [m];

$I_{r,1}^j$: refração ionosférica para a frequência L_1 [m];

γ : constante: $\gamma = (f_1 / f_2)^2 = (77 / 60)^2 = 1,646\dots$;

$B_{r,1}, B_{r,2}$: erro instrumental do receptor r em L_1 e L_2 [m];

B_1^j, B_2^j : erro instrumental do satélite j em L_1 e L_2 [m];

$M_{r,1}^j, M_{r,2}^j$: erro provocado pelo multicaminho para o código em L_1 e L_2 [m];

$\varepsilon_{r,p_1}, \varepsilon_{r,p_2}$: resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados na estação r para os códigos nas duas frequências [m].

Segundo Hofmann-Wellenhof *et al.* (1994, p. 204), quando um receptor é ligado, a parte fracionária da fase é observada e um contador inteiro é inicializado. Durante o rastreamento, o contador é incrementado por um ciclo inteiro sempre que a fase muda de 2π para 0. Assim, para uma certa época posterior à época inicial, a fase observada acumulada é a soma da parte fracionária da fase (parte medida) com o contador inteiro. O número inteiro de ciclos iniciais entre o satélite e o receptor é desconhecido e é conhecido como *ambiguidade*. Enquanto não houver perda de sinal o termo ambiguidade permanece o mesmo.

De forma similar às equações 2.1 e 2.2, obtém-se as equações de observação da fase da portadora (LIU, 2004, p. 56):

$$\lambda_1 \Phi_{r,1}^j = \rho_r^j + c(\delta t_r - \delta t^j) + O^j + T_r^j - I_{r,1}^j + \lambda_1 N_{r,1}^j + b_{r,1} + b_1^j + m_{r,1}^j + \varepsilon_{r,\phi_1} \quad (2.3)$$

$$\lambda_2 \Phi_{r,2}^j = \rho_r^j + c(\delta t_r - \delta t^j) + O^j + T_r^j - \gamma I_{r,1}^j + \lambda_2 N_{r,2}^j + b_{r,2} + b_2^j + m_{r,2}^j + \varepsilon_{r,\phi_2} \quad (2.4)$$

onde:

$\Phi_{r,1}^j, \Phi_{r,2}^j$: fase da onda portadora medida entre o satélite j e o receptor r nas frequências L_1 e L_2 [-];

λ_1, λ_2 : comprimento de onda nas frequências L_1 e L_2 [m];

$N_{r,1}^j, N_{r,2}^j$: ambiguidades inteiras em L_1 e L_2 [-];

$b_{r,1}, b_{r,2}$: erro instrumental do receptor r em L_1 e L_2 [m];

b_1^j, b_2^j : erro instrumental do satélite j em L_1 e L_2 [m];

$m_{r,1}^j, m_{r,2}^j$: erro provocado pelo multicaminho da fase da portadora em L_1 e L_2 [m];

$\varepsilon_{r,\phi_1}, \varepsilon_{r,\phi_2}$: resíduos de efeitos aleatórios e parâmetros não modelados na estação r para as duas frequências [m].

2.4 ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO GPS

Na sequência serão descritos brevemente alguns dos erros sistemáticos que atuam no posicionamento GPS, dando-se especial atenção àqueles envolvidos no posicionamento absoluto. No posicionamento relativo alguns destes erros podem ser negligenciados, devido à sua magnitude ser desprezível para a precisão do posicionamento, ou cancelados por meio de técnicas especiais de observação.

2.4.1 Órbita e Relógio dos Satélites

As coordenadas dos satélites podem ser obtidas em tempo real, por meio das efemérides transmitidas, ou no modo pós-processado, por meio das efemérides precisas. Além destas opções, tem-se as efemérides precisas estimadas quase em tempo real, por meio de serviços recentemente disponibilizados aos usuários GPS.

As efemérides transmitidas, disponíveis nas mensagens de navegação, permitem o cálculo das coordenadas dos satélites em tempo real. Elas contêm os parâmetros para corrigir o relógio dos satélites, os elementos keplerianos necessários para o cálculo da órbita normal, e os parâmetros perturbadores da órbita normal (MONICO, 2000, p. 101). A desvantagem destas efemérides é a baixa precisão, tanto das coordenadas quanto dos relógios dos satélites, conforme o quadro 2.1.

O erro do relógio do satélite pode ser modelado por meio de três coeficientes de um polinômio (a_0, a_1, a_2) para a época t em relação a uma época de referência t_0 segundo a equação:

$$\delta t^j = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (2.5)$$

Hofmann-Wellenhof *et al.* (1994, p. 178) avalia que o polinômio (equação 2.5) remove grande parte do erro do relógio do satélite, porém uma pequena parte ainda permanece.

Um conjunto de centros de análises contribuem para a geração de produtos combinados do IGS, cuja responsabilidade fica a cargo do Coordenador dos Centros de Análise (ingl. *Analysis Center Coordinator – ACC*) (IGS, 2009a). As efemérides combinadas do IGS podem ser classificadas em: finais, rápidas e ultrarrápidas. As coordenadas e o erro do relógio do satélite são tabulados em arquivos no formato SP3a. Segundo Jensen e Ovstedal (2008, p. 174), as coordenadas encontram-se no ITRF (ingl. *International Terrestrial Reference Frame*) mais recente e para a época de observação.

Segundo IGS (2007), o emprego das efemérides precisas finais permite a obtenção de coordenadas dos satélites com precisão melhor que 5 cm e relógios com precisão melhor que 0,1 ns, porém com uma latência de pelo menos duas semanas (quadro 2.1). Já as órbitas rápidas, com latência de 17 horas, fornecem coordenadas com precisão comparável ao dos produtos finais.

O erro do relógio dos satélites pode ser obtido com um intervalo inferior ao das efemérides, empregando-se neste caso, outro produto IGS: arquivos RINEX de relógio. Neste caso, o intervalo das observações pode ser de 30 segundos.

A partir da semana 1267, as efemérides ultrarrápidas passaram a ser disponibilizadas quatro vezes ao dia: 03:00h, 09:00h, 15:00h e 21:00h (Tempo Universal Coordenado – TUC). Ao contrário das demais efemérides que cobrem 24 horas (das 00:00h às 23:45h), as efemérides ultrarrápidas cobrem 48 horas. As primeiras 24 horas são baseadas em observações, sendo disponibilizadas com 3 horas de latência. Já as outras 24 horas são órbitas preditas, extrapoladas a partir de valores observados. As efemérides ultrarrápidas observadas tem precisão melhor que 5 cm para as coordenadas e de 0,2 ns para o erro do relógio, enquanto que as ultrarrápidas preditas tem precisão de 10 cm para as coordenadas e 5 ns para o relógio. Observa-se neste caso que o erro do relógio é somente pouco melhor do erro do relógio oriundo das efemérides transmitidas.

O IGDG (ingl. *Internet-based Global Differential GPS*) é um serviço recente que, dentre outras opções, fornece correções para a órbitas a cada 29 segundos, e para os relógios a cada 1 segundo, com precisão de 20 cm para as coordenadas

dos satélites e 0,5 ns para o relógio. As correções podem ser obtidas via *internet* a partir do servidor da JPL com intervalos de 1 segundo (JPL, 2009).

Efemérides e Relógio dos Satélites GPS		Precisão	Latência	Atualização	Intervalo
Transmitida	Órbita	~160 cm	tempo real	--	diário
	Relógio	~7 ns			
Ultrarrápida (predita)	Órbita	~10cm	tempo real	4 vezes ao dia	15 min
	Relógio	~5 ns			
Ultrarrápida (observada)	Órbita	<5 cm	3 horas	4 vezes ao dia	15 min
	Relógio	~0,2 ns			
Rápida	Órbita	<5 cm	17 horas	diariamente	15 min
	Relógio	0,1 ns			5 min
Final	Órbita	<5 cm	13 dias	semanalmente	15 min
	Relógio	<0,1 ns			5 min
IGDG	Órbita	20 cm	~ 4 segundos	1 segundo	29 s
	Relógio	0,5 ns			1 s

QUADRO 2.1 – ÓRBITAS E RELÓGIO DOS SATÉLITES
 FONTE: Adaptado de IGS (2007); Gao e Shen (2004)

Usualmente as coordenadas dos satélites são injuncionadas no ajustamento de observações, desta forma, o erro devido à orbita é propagado ao usuário. No posicionamento relativo, para linhas de base curtas (20 km de acordo com Wanninger, 2004), esse erro pode não assumir grande proporções, porém para linhas de base maiores o emprego das efemérides precisas reduz o erro. Para o posicionamento absoluto, no entanto, verifica-se que os erros são propagados diretamente ao usuário, por isso o emprego de produtos precisos é fundamental para um processamento preciso.

2.4.2 Relatividade

Diferentemente do posicionamento diferencial (relativo), correções relativísticas devem ser aplicadas ao PPP (WITCHAYANGKOON, 2000, p. 34). Estas correções mudam de época para época e de satélite para satélite, conforme resultados apresentados por CARARO (2003) e estudos de outros autores.

A seguinte equação pode ser empregada para a correção relativística periódica (ICD-GPS-200C, 2000, p. 88-89):

$$\Delta t_{rel} = - \frac{2\vec{R} \cdot \vec{V}}{c^2} \quad (2.6)$$

onde:

- Δt_{rel} : correção relativística periódica;
- \vec{R} : vetor posição do satélite;
- \vec{V} : vetor velocidade do satélite;
- c : velocidade da luz no vácuo.

Segundo Kouba (2009), esta mesma convenção também foi adotada pelo IGS, isto é, as soluções para os relógios de todos os satélites GPS são consistentes com a equação 2.6.

2.4.3 Erro Instrumental

Este erro é decorrente da diferença dos caminhos percorridos pelas portadoras L₁ e L₂ pelo *hardware* do satélite e do receptor (MONICO, 2008, p. 195). Para o satélite ele é conhecido como T_{GD} (ingl. *Time Group Delay*), é distinto para cada SV (ingl. *Space Vehicle*) e é disponibilizado nas mensagens de navegação (WILSON *et al.*, 1999).

O erro instrumental está presente nas observações dos códigos C/A (aqui denotado como C₁), P₁ e P₂, e pelo fato de não poderem ser acessados isoladamente, costuma-se realizar diferenças entre eles (DACH *et al.*, 2007, p. 280). Usualmente se empregam as seguintes diferenças:

$$B_{P1} - B_{P2} = B_{P1-P2} \quad (2.7)$$

$$B_{P1} - B_{C1} = B_{P1-C1} \quad (2.8)$$

B_{P1-P2} e B_{P1-C1} são conhecidos como DCB (ingl. *Differential Code Biases*).

Para os satélites, a relação entre o DCB e o T_{GD} é dada por (WILSON *et al.*, 1999):

$$T_{GD} = \frac{1}{1 - \gamma} B_{P_1 - P_2} + B_0 \quad (2.9)$$

onde:

T_{GD} : atraso de grupo;

γ : constante apresentada anteriormente (seção 2.3): $\gamma = (f_1 / f_2)^2$;

$B_{P_1 - P_2}$: DCB entre os códigos P_1 e P_2 ;

B_0 : constante arbitrária.

Devido à condição de média zero usualmente imposta na estimativa do DCB dos satélites (DACH *et. al.*, 2007), isto é, a média dos valores do DCB de todos os satélites é zero, a constante B_0 é utilizada para relacionar o DCB e o T_{GD} .

Para o caso dos receptores, os valores de DCB são importantes para o cálculo do valor absoluto do conteúdo total de elétrons (TEC) a partir de observações de dupla frequência (MONICO, 2008, p. 195).

As relações do $B_{P_1 - P_2}$ e $B_{P_1 - C1}$ para as combinações lineares mais importantes podem ser obtidas em DACH *et al.* (2007, p. 283).

2.4.4 Deslocamento e Variação do Centro de Fase de Antenas

O ponto de recepção do sinal GPS é denominado centro de fase eletrônico, ou simplesmente centro de fase da antena, o qual não necessariamente coincide com o centro geométrico da antena. Para que o centro de fase seja definido, ele deve ser vinculado a um ponto físico da antena, conhecido como ARP (ingl. *Antenna Reference Point*). Este ponto é empregado como referência para a centragem da antena e medida de altura em relação a um marco (FREIBERGER JUNIOR, 2007, p. 38).

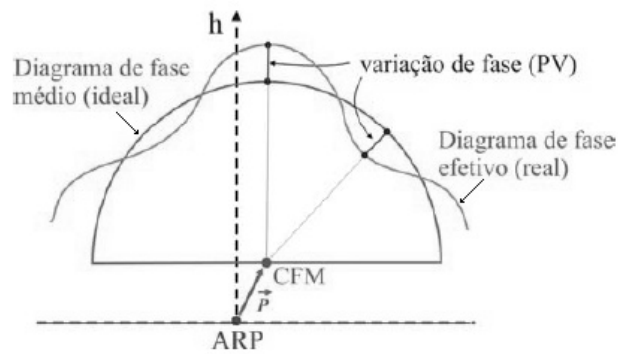


FIGURA 2.1 – RELAÇÃO ENTRE O ARP, CFM E VARIAÇÃO DO CENTRO DE FASE
 FONTE: Freiburger Junior (2007, p. 41)

Freiberger Junior (2007, p. 38) esclarece que o centro de fase médio (CFM) define o centro de uma superfície esférica que corresponde ao diagrama de fase médio (ideal) que mais se aproxima do diagrama de fase efetivo (real), e o vetor que liga o ARP ao CFM é denominado deslocamento do centro de fase (ingl. *Phase Center Offset – PCO*), representado na figura 2.1 pelo vetor \vec{P} . O diagrama de fase é definido como a representação espacial da variação de fase do campo irradiado (RIOS e TERRA, 1982, p. 7, apud FREIBERGER JUNIOR, 2007, p. 34). O autor ainda afirma que devido à características construtivas das antenas GPS, ocorrem alterações na recepção do sinal que originam desvios da fase em relação ao diagrama de fase ideal, denominadas variações do centro de fase (ingl. *Phase Center Variation – PCV*).

Monico (2008, p. 230) afirma que para levantamentos de alta precisão, todas as antenas envolvidas no levantamento devem ser calibradas para reduzir esses erros. A calibração consiste em determinar o deslocamento de centro de fase em relação ao ARP (PCO) e a variação do centro de fase (PCV).

Na Universidade Federal do Paraná (UFPR), Freiburger Junior (2007) implantou a primeira base de calibração de antenas no país, denominada BCAL/UFPR. Huinca (2009) estudou o método de calibração relativa em campo nesta base, onde foram determinados parâmetros de calibração relativos, mas em nível absoluto. A autora analisou, dentre outros assuntos, o efeito multicaminho no entorno da antena e investigou a influência dos parâmetros no processamento de linhas de base. Os resultados alcançados mostram que desconsiderar parâmetros de calibração no processamento pode gerar erros de aproximadamente 6 cm em

altitude. Os resultados estão de acordo com Mader (1999, p. 50), o qual adverte que ignorar as variações do centro de fase pode causar erros verticais de até 10 cm.

O ponto de referência para a emissão dos sinais GPS é o centro de fase da antena do satélite. Diferente das órbitas transmitidas, nas quais a órbita está referenciada ao centro de fase da antena do satélite, as órbitas precisas do IGS empregam modelos referenciados ao centro de massa do satélite (KOUBA e HÉROUX, 2009).

O lançamento dos primeiros satélites do Bloco II R, a partir de 1997, mostrou que os deslocamentos nos eixos eram diferentes dos satélites anteriores. Para assegurar que a determinação do erro do relógio dos satélites pelos vários centros de análises do IGS pudessem ser comparados e combinados adequadamente, o IGS adotou, a partir de novembro de 1998, os valores disponíveis no quadro 2.2 para o deslocamento de centro de fase das antenas dos satélites (RAY e SENIOR, 2005, p. 216):

Satélite	dx (m)	dy (m)	dz (m)
Bloco II / IIA	0,279	0,000	1,023
Bloco II R	0,000	0,000	0,000

QUADRO 2.2 – DESLOCAMENTO DO CENTRO DE FASE RELATIVO ADOTADO PELO IGS
 FONTE: Adaptado de RAY e SENIOR (2005, p. 216)

Neste caso a origem do sistema de coordenadas é o centro de massa do satélite, onde o eixo Z é definido na direção do centro de massa da Terra, o eixo X na direção do sol e o eixo Y torna o sistema destrógiro (figura 2.2).

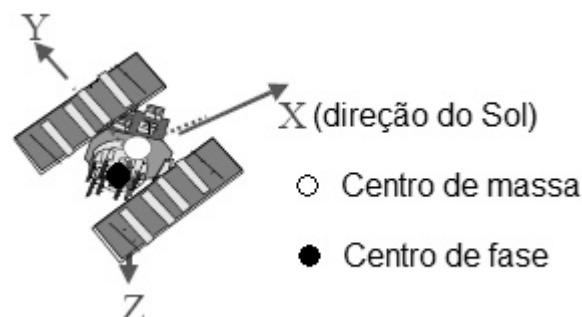


FIGURA 2.2 – SISTEMA DE COORDENADAS FIXO AO SATÉLITE
 FONTE: Adaptado de Kouba (2009)

Kouba (2009) esclarece que os valores relativos foram adotados pelo IGS até 4 de novembro de 2006 (semana GPS 1399). A partir do dia 5 de novembro de

2006 (semana GPS 1400) o IGS adota o deslocamento e variação do centro de fase absolutos, tanto para as antenas dos satélites, quanto para a dos receptores.

2.4.5 Fase *Wind-up*

Segundo Kouba (2009), os satélites GPS transmitem ondas polarizadas circularmente à direita, e portanto, as observações de fase dependem da posição mútua entre as antenas do satélite e do receptor. Uma rotação de qualquer uma das duas antenas em torno de seu eixo vertical irá mudar a fase da onda portadora em até um ciclo. Esse efeito é conhecido como *phase wind up*.

Leick (2004, p. 233) afirma que este erro é praticamente negligenciável no posicionamento relativo para linhas de base curtas (< 20 km) quando se empregam duplas diferenças de fase. Para linhas de base maiores, no entanto, negligenciar este erro pode trazer problemas para fixar as ambiguidades. Para o posicionamento absoluto, Kouba (2009) afirma que desconsiderar este efeito pode gerar erros da ordem de decímetros. Observa-se que não existe este efeito para as pseudodistâncias.

Expressões matemáticas para a correção desse efeito e maiores detalhes sobre este efeito podem ser encontrados em: Faustino (2006), Kouba (2009) e Witchayangkoon (2000).

2.4.6 Multicaminho

O multicaminho é um fenômeno pelo qual um sinal chega a antena do receptor por meio de múltiplos caminhos, e isto acontece devido à reflexão e difração do sinal (BRAASH, 1995, p. 547). Algumas possíveis causas do multicaminho podem ser: construções, veículos, e outras superfícies que possam refletir o sinal oriundo do satélite.

O multicaminho afeta tanto observações de fase quanto as do código, mas em magnitudes diferentes. O efeito sobre as observações do código P são afetadas

com uma magnitude duas vezes maior que as observações de fase, podendo alcançar de decímetros a metros, e o efeito sobre o código C/A pode ser de vários metros (SEEBER, 2003, p. 316). Hofmann-Wellenhof *et al.* (2003, p. 126) afirma que em condições extremas o multicaminho pode causar até perda de sinal.

Alguns cuidados podem ser tomados para minimizar o efeito do multicaminho no levantamento, dentre eles (SEEBER, 2003, p. 317): seleção cuidadosa da estação de forma a evitar superfícies refletoras nas proximidades, empregar antenas com plano de terra (ingl. *ground plane*) e utilizar antenas do tipo *choke ring*, projetadas de forma a minimizar esse erro.

2.4.7 Refração Troposférica

A camada da atmosfera mais próxima do solo é a troposfera (figura 2.3). Ela se estende da superfície da Terra a uma altitude aproximada de 10 km (JENSEN e OVSTEDAL, 2008, p. 175). Esta camada concentra 80% do total de massa molecular da atmosfera, e aproximadamente quase todo o vapor de água e aerossóis. A temperatura diminui com o aumento da altitude, e o gradiente da temperatura varia em função da altitude, estação do ano e da localização geográfica.

A próxima camada é a tropopausa, caracterizada por uma mudança brusca do gradiente da temperatura. A altura da tropopausa é de aproximadamente 7 a 10 km nos pólos e de 16 a 18 km sobre as regiões equatoriais. A camada superior é a estratosfera, estendendo-se aproximadamente até 50 km de altitude. A parte mais baixa da estratosfera (até 20 km) é praticamente isotérmica, e se verifica um aumento gradual da temperatura em função da altitude. A troposfera e a parte baixa da estratosfera podem ser agrupadas em uma única região, denominada de atmosfera neutra (MENDES, 1999, p. 24-29).

O efeito devido à parte não ionizada da atmosfera (ou atmosfera neutra) é denominado atraso troposférico ou refração troposférica. Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001, p. 106) esclarece que esse nome não é totalmente apropriado porque exclui a estratosfera, também parte constituinte da atmosfera neutra, porém, como a contribuição da troposfera é predominante, esse nome é adotado na literatura.

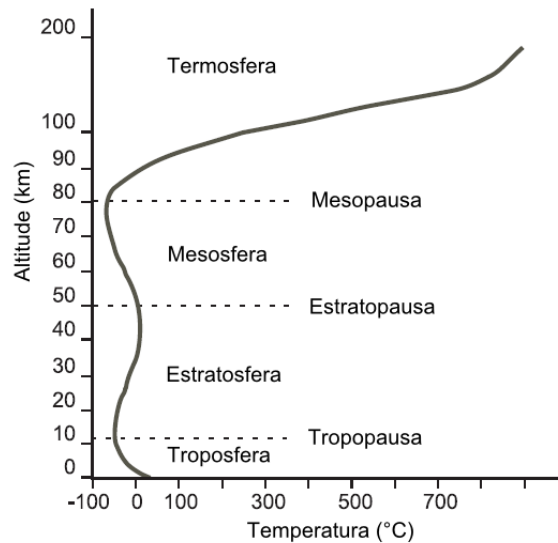


FIGURA 2.3 – PERFIL VERTICAL DA ATMOSFERA
 FONTE: Adaptado de Liljequist e Cehak (1994) apud Mayer (2006)

A atmosfera neutra é um meio não dispersivo para sinais com frequências na banda L, como L₁ e L₂ com as quais o GPS opera (SPILKER, 1996, p. 524). Assim, a distinção entre as frequências não se faz necessária, e o emprego de duas frequências não traz qualquer benefício no sentido de reduzir este erro.

O atraso troposférico T ao longo da trajetória entre o satélite e o receptor é definido como (LEICK, 2004, p. 194):

$$T = \int n ds - \int ds = \int (n - 1) ds \quad (2.10)$$

onde n representa o índice de refração do ar e ds o comprimento infinitesimal do caminho percorrido pelo sinal no meio. A primeira integral se refere ao caminho (curvo) do sinal do satélite à estação. Leick (2004, p. 195) esclarece que o caminho é curvo devido ao fato do índice de refração do ar decrescer em função da altitude. A segunda integral, por sua vez, define a distância geométrica entre o satélite e o receptor.

Como n tem valores muito próximos da unidade, Sapucci (2001, p. 23) afirma ser conveniente expressar o atraso troposférico empregando outra grandeza, denominada refratividade do ar (N), dada por:

$$N = (n - 1)10^6 \quad (2.11)$$

Desta forma, a equação 2.10 pode ser escrita em função da refratividade do ar (equação 2.11), na qual a integral deve ser realizada ao longo da trajetória do sinal na atmosfera.

$$T = 10^{-6} \int N ds \quad (2.12)$$

Segundo Seeber (2003, p. 314), a influência da troposfera nas observações GPS é expressa normalmente em função de duas componentes: a hidrostática (seca) e a úmida. A componente hidrostática corresponde a 90% do efeito total da refração troposférica e pode ser modelada com acurácia empregando algum dos modelos atualmente existentes. A componente úmida, no entanto, contribui com os outros 10%, e é difícil de ser modelada, pois depende da distribuição do vapor de água na atmosfera.

Escrevendo a refratividade em função das componentes hidrostática (índice h) e úmida (índice w , do inglês *wet*), a refração troposférica total pode ser escrita como (HOFMANN-WELLENHOF, 2001, p. 107):

$$T = 10^{-6} \int N_h ds + 10^{-6} \int N_w ds \quad (2.13)$$

Integrando a equação 2.13 ao longo da direção zenital, e associando cada uma das componentes a uma função de mapeamento, o atraso troposférico total é determinado por:

$$T^z = T_h^z \cdot m_h + T_w^z \cdot m_w \quad (2.14)$$

onde:

T^z : atraso troposférico total na direção do zênite;

T_h^z, T_w^z : atraso troposférico para as componentes hidrostática e úmida, na direção zenital;

m_h, m_w : funções de mapeamento para as componentes hidrostática e úmida.

O atraso total na direção do zênite pode alcançar 2,3 metros, e o valor aumenta numa proporção inversa ao ângulo de elevação do satélite, chegando a aproximadamente 20 metros para um ângulo de elevação de 10° em relação ao horizonte (SEEBER, 2003, p. 315).

Um dos modelos mais empregados na modelagem do atraso troposférico é o modelo de Saastamoinen. Segundo Dach *et al.* (2007, p. 242), este modelo é baseado nas leis associadas ao gás ideal. Este modelo pode ser expresso, em metros, segundo a expressão (COVE *et al.*, 2004):

$$T_h^z = 0,002277(1 + 0,0026\cos(2\phi) + 0,00028H)p \quad (2.15)$$

$$T_w^z = 0,002277\left(\frac{1255}{t} + 0,05\right)e \quad (2.16)$$

onde:

- ϕ latitude do receptor;
- H altitude do receptor [km];
- p pressão atmosférica [mbar];
- t temperatura [K];
- e pressão parcial do vapor de água [mbar].

Uma boa aproximação para a função de mapeamento é $1/\text{sen}(E)$, onde E representa o ângulo de elevação do satélite. Kouba (2007, p. 194) afirma que para o caso de análises mais precisas, funções de mapeamento mais refinadas devem ser empregadas. Atualmente, funções na forma de frações contínuas, inicialmente introduzidas em 1972 por Marini, são as mais utilizadas:

$$m = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\text{sen}(E) + \frac{b}{\text{sen}(E) + \frac{c}{\text{sen}(E) + \dots}}} \quad (2.17)$$

onde os coeficientes a , b e c são valores distintos para as componentes hidrostática e a úmida.

Niell (1996) desenvolveu funções de mapeamento individuais para as duas componentes, baseadas também em frações contínuas. A função de mapeamento da componente hidrostática é dependente da localização geográfica da estação (latitude e altitude), bem como, dia do ano. Para a componente úmida não existe dependência temporal, somente a latitude da estação é necessária.

2.4.8 Refração Ionosférica

A ionosfera é constituída por camadas que se estendem de 50 a 1.000 km, e é um meio dispersivo em relação às frequências da banda L do GPS (HOFMANN-WELLENHOF, 2001, p. 99). Desta forma, o atraso ionosférico depende da frequência utilizada, portanto, esta propriedade permite que o seja estimado quando se empregam observações das duas frequências.

Considerando uma onda eletromagnética particular, de frequência f e comprimento de onda λ , que se propaga no espaço, a velocidade de sua fase (índice p , do inglês *phase*) pode ser escrita como (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001, p. 97):

$$v_p = \lambda \cdot f \quad (2.18)$$

onde v_p é a velocidade de fase. As ondas portadoras L_1 e L_2 do GPS se propagam com essa velocidade.

Considerando agora um grupo de ondas com frequências ligeiramente diferentes, a chamada velocidade de grupo v_g , que está relacionada com as medidas do código, é definida como (BAUER, 1994, p. 96 apud HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001, p. 97):

$$v_g = - \frac{df}{d\lambda} \lambda^2 \quad (2.19)$$

A relação entre a velocidade de fase e a de grupo é descrita pela equação de Rayleigh (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2001, p. 97):

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda} \quad (2.20)$$

Ainda segundo Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001, p. 98), a propagação de uma onda em um meio depende do índice de refração n . Assim, a velocidade de propagação dessa onda pode ser escrita como:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.21)$$

Aplicando a expressão (2.21) para as velocidade de fase e de grupo, e empregando os índices de refração, tem-se:

$$v_p = \frac{c}{n_p} ; v_g = \frac{c}{n_g} \quad (2.22)$$

Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001, p. 98) mostram que a equação de Rayleigh pode ser obtida em função do índice de refração, segundo:

$$n_g = n_p - \lambda \frac{dn_p}{d\lambda} \quad (2.23)$$

e uma equação equivalente é escrita em função da frequência:

$$n_g = n_p + f \frac{dn_p}{df} \quad (2.24)$$

Para um meio dispersivo a derivada dn/df é diferente de zero, e conseqüentemente as velocidades de fase e grupo serão diferentes.

Seeber (2003, p. 55) mostra que o índice de refração da fase pode ser aproximado pela série:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.25)$$

Os coeficientes c_i são independentes da frequência, mas dependentes da grandeza n_e , que representa o número de elétrons por metro cúbico, ou densidade de elétrons, ao longo do caminho de propagação (HOFMANN-WELLENHOF, 2001, p. 99; SEEBER, 2003, p. 54). Considerando somente os termos de primeira ordem:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (2.26)$$

Introduzindo a equação 2.26, bem como o resultado da derivada desta equação em relação à frequência, na equação 2.24, chega-se a:

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (2.27)$$

onde o coeficiente c_2 vale (SEEBER, 2003, p. 55):

$$c_2 = -40,3n_e \text{ [Hz}^2\text{]} \quad (2.28)$$

Observa-se que os efeitos de primeira ordem da ionosfera para as velocidades de fase e de grupo (equação 2.29) são de mesma magnitude, porém de sinais opostos:

$$v_p = \frac{c}{1 - \frac{40,3n_e}{f^2}} ; v_g = \frac{c}{1 + \frac{40,3n_e}{f^2}} \quad (2.29)$$

Além disso, estas expressões mostram que a velocidade de grupo é menor que a velocidade de fase, isto significa que as observações do código sofrem um atraso enquanto que as observações de fase um avanço. Portanto, a medida da

pseudodistância do código é maior que a distância geométrica medida entre o satélite e o receptor, e por outro lado, a medida da pseudodistância da fase é menor que esta (HOFMANN-WELLENHOF, 2001, p. 99).

A distância medida s pode ser escrita como:

$$s = \int nds \quad (2.30)$$

A diferença entre a distância medida s , ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor, e a distância geométrica s_0 , ao longo da linha reta, é a refração ionosférica, segundo (com $n = 1$):

$$I = \int nds - \int ds_0 \quad (2.31)$$

Introduzindo os índices de refração das equações 2.26 e 2.27 em 2.31, e fazendo uma simplificação na qual a primeira integral será ao longo da distância geométrica (linha reta), tem-se:

$$I_p = \int \frac{c_2}{f^2} ds_0 \quad ; \quad I_g = - \int \frac{c_2}{f^2} ds_0 \quad (2.32)$$

e inserindo 2.28 em 2.32, resulta em:

$$I_p = - \frac{40,3}{f^2} \int n_e ds_0 \quad ; \quad I_g = \frac{40,3}{f^2} \int n_e ds_0 \quad (2.33)$$

O conteúdo total de elétrons (TEC) é definido como sendo o número total de elétrons contidos em uma coluna de seção transversal de 1 m^2 que se estende ao longo do caminho entre o satélite e o receptor, dado em elétrons/ m^2 (LEICK, 2004, p. 215), de acordo com:

$$TEC = \int n_e ds_0 \quad (2.34)$$

Finalmente, substituindo 2.34 em 2.33, chega-se a:

$$I_i = \frac{40,3TEC}{f_i^2} \quad (2.35)$$

Observa-se que o atraso ionosférico é diretamente proporcional ao TEC e inversamente proporcional ao quadrado da frequência f ($i = 1$ ou 2). Isto significa que os efeitos da ionosfera sobre frequências mais altas são menores.

Brunner e Gu (1991) propuseram um modelo que considera os termos de ordem maior, onde o efeito devido à ionosfera é calculado no caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor, ao invés de ser na linha reta entre eles. Neste caso, o conhecimento do efeito do campo magnético é necessário.

Desconsiderando o erro de *hardware*, O TEC pode ser diretamente derivado das observações do código (P_1, P_2), segundo a equação 2.36. Maiores detalhes são abordados no capítulo 4.

$$TEC = \frac{f_1^2(P_1 - P_2)}{40,3(1 - \gamma)} \quad (2.36)$$

2.4.9 Marés Terrestres

Segundo Monico (2008, p. 239), marés terrestres são deformações sofridas pela crosta da Terra devido às forças de maré. Gemael (1994, p. 284) define força de maré sobre um ponto como sendo a diferença entre a força de atração exercida pelo Sol e pela Lua sobre a unidade de massa colocada neste ponto e a força no centro do modelo.

As variações das marés terrestres representadas por harmônicos esféricos de grau e ordem (n, m) são caracterizadas pelos números de *Love* e *Shida* (McCARTHY e PETIT, 2003, p. 74). Segundo Leick (2004, p. 19), estes números descrevem as propriedades elásticas do modelo da Terra.

A correção da força de marés terrestres pode atingir valores da ordem 30 cm na direção radial, e 5 cm na horizontal. Ela é constituída de uma variação

permanente, dependente da latitude, e de uma parte periódica com predominância de períodos semidiurnos e diurnos (KOUBA, 2009; LEICK, 2004, p. 19).

A correção das marés terrestres podem ser modeladas empregando a equação (KOUBA, 2009; ABDEL-SALAM, 2005, p. 38), onde são consideradas tanto a parte permanente quanto periódica:

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{\vec{r}^4}{\vec{R}_j^3} \left\{ [3l_2(\widehat{R}_j \cdot \widehat{r})] \widehat{R}_j + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\widehat{R}_j \cdot \widehat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \widehat{r} \right\} + [-0,025m \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \phi \cdot \text{sen}(\theta_g + \lambda)] \cdot \hat{r} \quad (2.37)$$

onde:

$\Delta \vec{r}$: vetor de correção das marés terrestres $\Delta \vec{r}^T = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]$;

GM, GM_j : constante gravitacional da Terra, da Lua ($j = 2$) e do Sol ($j = 3$);

\vec{r}, \vec{R}_j : vetores com origem no geocentro e em direção à estação, à Lua e ao Sol;

$\widehat{r}, \widehat{R}_j$: respectivos vetores unitários;

l_2, h_2 : números nominais de *Love* e *Shida* de grau 2 (0,609 e 0,085);

ϕ, λ : latitude e longitude da estação;

θ_g : tempo sideral médio de Greenwich.

No posicionamento relativo para linhas de base inferiores a 100 km, devido ao fato das estações base e teste terem praticamente a mesma variação de maré, este erro tem pouco influência no posicionamento. Entretanto, negligenciar estas correções no posicionamento por ponto causa erros sistemáticos da ordem de alguns centímetros no posicionamento (KOUBA, 2009).

2.4.10 Carga Oceânica

A carga oceânica está relacionada com a deformação sofrida pelo piso oceânico e regiões costeiras resultante da redistribuição da água do mar ocorrida durante as marés oceânicas (LEICK, 2004, p. 19).

Kouba (2009) afirma que para o caso do posicionamento por ponto estático, em que são estimados parâmetros da troposfera e relógio, correções devido à carga dos oceanos devem ser levadas em conta, mesmo para períodos de ocupação de 24 horas. Entretanto, estas correções podem ser negligenciadas se as estações estiverem mais de 1.000 km da costa.

O efeito da carga oceânica pode ser modelado para uma componente Δc (nas direções radial, oeste e sul), para uma estação específica e época t , segundo a equação (McCARTHY, 2003, p. 73; WITCHAYANGKOON, 2000, p. 43):

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (2.38)$$

onde:

f_j, u_j : dependem da longitude do nodo lunar;

j : representa os onze termos parciais de marés, designados como M_2, S_2, N_2, K_2 (semidiurnos), K_1, O_1, P_1, Q_1 (diurnos), M_f, M_m e S_{sa} (longo período);

A_{cj}, Φ_{cj} : amplitude e fase dependentes da estação; refletem a geografia costeira, e as estruturas elásticas e de densidade do modelo da Terra;

ω_j : velocidade angular da maré;

χ_j : argumento astronômico (para $t = 0h$): longitude média do Sol, da Lua e perigeu lunar.

Coefficientes para correção da carga oceânica, para uma ou várias estações, pode ser obtidos no sítio do *Onsala Space Observatory* (Suécia): <http://www.oso.chalmers.se/~loading/>. Maiores detalhes, consultar Kouba (2009).

2.4.11 Carga Atmosférica

As variações temporais e a distribuição geográfica da massa atmosférica deformam a superfície terrestre. Alguns estudos mostraram que as variações verticais podem ser de até 25 mm, enquanto que as horizontais de até um terço desse valor (McCARTHY, 1996, p. 68; WITCHAYANGKOON, 2000, p. 49).

Uma expressão que permite calcular o efeito vertical da carga atmosférica Δr (em mm), é dada por (McCARTHY, 1996, p. 68):

$$\Delta r = -0,35p - 0,55\bar{p} \quad (2.39)$$

onde p é a anomalia da pressão local, em relação à pressão padrão de 1013 mbar, e \bar{p} é a média da anomalia da pressão dentro de uma região circular de raio igual a 2.000 km (em mbar).

2.4.12 Variação Temporal das Coordenadas Devido às Placas Tectônicas

A tectônica de placas tem por base um modelo da crosta terrestre que é dividida em placas rígidas e que estão sujeitas a movimentos relativos (TURCOTE e SCHUBERT, 2001, apud BAEZ, 2006, p. 22). Devido ao movimento das placas, com movimentos relativos entre elas de até 5 cm por ano, as coordenadas fixas de estações começam a se tornar inconsistentes umas com as outras (McCARTHY, 1996, p. 13).

Modelos globais para o movimento de placas, baseados numa média de alguns milhões de anos atrás, são padrões úteis para a comparação de movimentos muito mais curtos, especialmente por aqueles estimados por técnicas espaciais (deMETS *et al.*, 1994). O modelo recomendado pelo IERS (ingl. *International Earth Rotation and Reference Systems Service*) é o NNR-NUVEL-1A (ingl. *No Net Rotation – Northern University Velocity Model 1A*) (McCARTHY, 1996, p. 13).

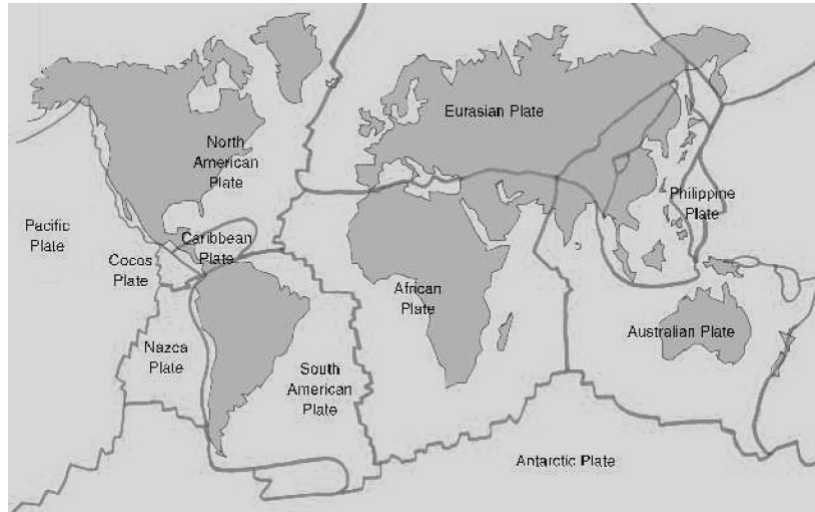


FIGURA 2.4 – MAPA DAS PLACAS TECTÔNICAS
 FONTE: McCarthy (1996, p. 14)

O NNR-NUVEL-1A descreve as velocidades angulares das placas litosféricas que compõe a crosta terrestre (figura 2.4). Segundo Monico (2008, p. 133), o movimento das placas litosféricas, no modelo, é representado pelo vetores de rotação de Euler $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$, e como estes vetores são proporcionais às velocidades angulares da placa, eles podem ser transformados em velocidades.

Valores aproximados para o vetor velocidade \vec{V}_0 podem ser obtidos a partir do vetor das coordenadas da estação \vec{X}_0 e as velocidades angulares provenientes do modelo, conforme a equação (SAPUCCI e MONICO, 2001, p. 166):

$$\vec{V}_0 \approx R(\Omega) \cdot \vec{X}_0 \quad (2.40)$$

onde $R(\Omega)$ é a matriz antissimétrica de rotação que contém as velocidades angulares da placa litosférica em relação aos eixos (X, Y, Z) definida por:

$$R(\Omega) = \begin{vmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{vmatrix} \quad (2.41)$$

O quadro 2.3 mostra as velocidades angulares do modelo NNR-NUVEL-1A para apenas duas placas litosféricas: Eurásia e América do Sul. As velocidades

angulares para as demais placas pode ser obtidas em McCarthy (1996, p. 14). As unidades empregadas são radianos por milhões de anos (rad/M ano).

Placa	Abreviatura	Ω_x (rad/M ano)	Ω_y (rad/M ano)	Ω_z (rad/M ano)
Eurásia	EURA	-0,000981	-0,002395	0,003153
Sul Americana	SOAM	-0,001038	-0,001515	-0,000870

QUADRO 2.3 – VELOCIDADES ANGULARES PARA AS PLACAS EURÁSIA E AMÉRICA DO SUL
 FONTE: Adaptado de McCarthy (1996, p. 14)

Para um mesmo sistema de referência, as coordenadas da estação em uma época de referência t_0 podem ser atualizadas para a época t , conforme a equação (McCarthy e PETIT, 2003, p. 24):

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0(t - t_0) \quad (2.42)$$

2.5 COMBINAÇÕES LINEARES

Como visto na seção 2.3, as observáveis GPS são geradas a partir dos códigos ou pela fase da onda portadora. Considerando um receptor GPS que coleta observações de fase e código nas duas frequências, além das observações obtidas diretamente, ainda é possível combinar essas observáveis entre si e gerar uma grande variedade de outras observáveis, cada uma com suas características próprias. Dependendo do tipo de aplicação e o nível de acurácia que se procura, existem vantagens e desvantagens em certas combinações.

Seeber (2003, p. 258) apresenta cinco diferentes tipos de combinações lineares que podem ser efetuadas:

- i. entre diferentes estações;
- ii. entre observações de diferentes satélites;
- iii. entre observações de diferentes épocas;
- iv. entre observações do mesmo tipo; e
- v. entre observações de diferentes tipos.

Pelo fato do posicionamento absoluto envolver apenas uma estação, combinações entre observáveis de diferentes estações, como simples, duplas ou triplas diferenças entre estações não são possíveis. Entretanto, combinações entre observações de diferentes épocas ou satélites são possíveis. Ge *et al.* (2007), por exemplo, empregaram simples diferenças entre satélites no posicionamento PPP para estimar as ambiguidades ao nível de simples diferenças de forma semelhante com que se fixam as ambiguidades das duplas diferenças de fase.

Dos tipos de combinações listados anteriormente, dois deles merecem destaque neste trabalho. O primeiro trata da combinações entre observações do mesmo tipo (iv), quando serão abordadas duas combinações fundamentais neste estudo: combinação linear livre da ionosfera e combinação livre da geometria. O segundo tipo trata da combinação entre observações de diferentes tipos (v), onde serão apresentadas a combinação linear Melbourne-Wübbena e a suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora, tópico este que será tratado em maiores detalhes na seção 2.7. Os demais tópicos não serão abordados haja vista não estão relacionados diretamente com este trabalho. Maiores detalhes, no entanto, podem ser obtidos em: Krueger (1996, p. 21-23), Leick (2004, p. 175-177), Monico (2008, p. 263-278) e Seeber (1993, p. 254-257).

A combinação linear de medidas de fase das duas portadoras pode ser definido pela relação (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 1994, p. 95):

$$\Phi_{CL} = n_1\Phi_1 + n_2\Phi_2 \quad (2.43)$$

onde:

Φ_{CL} : observável resultante da combinação linear;

n_1, n_2 : números arbitrários;

Φ_1, Φ_2 : medidas da fase das ondas portadoras L_1 e L_2 , respectivamente.

e a frequência resultante da combinação linear (f_{CL}) é expressa em função dos mesmos números (n_1, n_2) e das frequências das observáveis originais nas duas frequências:

$$f_{CL} = n_1 f_1 + n_2 f_2 \quad (2.44)$$

o comprimento de onda obtido da combinação linear (λ_{CL}) também pode ser calculado pela divisão da velocidade da luz no vácuo (c) pela frequência da combinação linear (f_{CL}), escrito como:

$$\lambda_{CL} = \frac{c}{f_{CL}} \quad (2.45)$$

e o desvio-padrão da combinação linear (σ_{CL}) é obtido em função dos números arbitrários e do desvio-padrão da observação de fase original (σ_ϕ), segundo a equação (SEEBER, 2003, p. 262):

$$\sigma_{CL} = \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \sigma_\phi \quad (2.46)$$

Definindo os números (n_1, n_2) como:

$$n_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = 2,546... ; n_2 = - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = -1,546... \quad (2.47)$$

forma-se a chamada *combinação linear livre da ionosfera*, tanto para a fase (Φ_3) quanto para o código (P_3), de acordo com:

$$\Phi_3 = n_1 \Phi_1 + n_2 \Phi_2 ; P_3 = n_1 P_1 + n_2 P_2 \quad (2.48)$$

A escolha dos números arbitrários é realizada segundo duas condições: a necessidade em cancelar os efeitos ionosféricos e em manter um mesmo comprimento de onda (MONICO, 2008, p. 219).

Alguns autores indicam esta combinação com o índice “zero” (Φ_0, P_0). Seeber (2003, p. 310) afirma que os efeitos de primeira ordem devido à ionosfera são eliminados com esta combinação, enquanto que os efeitos de ordem maior

alcançam somente alguns centímetros. Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001, p. 105) afirma que uma desvantagem desta combinação é que a natureza inteira das ambiguidades é perdida.

Definindo agora os números arbitrários como: $n_1 = 1$ e $n_2 = -1$, chega-se à combinação linear livre de geometria para a fase e para o código, de acordo com:

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 ; P_4 = P_1 - P_2 \quad (2.49)$$

Esta combinação independe dos relógios do receptor e do satélite e da geometria (órbita e coordenadas da estação), pois estes termos são cancelados. Wild (1994) interpreta os termos restantes como a diferença da refração ionosférica em L_1 e L_2 . Para a fase, deve-se adicionar a diferença das ambiguidades nas duas frequências. Springer (2000, p. 17) ressalta que esta combinação é conveniente para a modelagem ionosférica e verificação de observações não diferenciadas. O programa Bernese, por exemplo, emprega esta observável para detectar a dimensão das perdas de ciclo para posterior correção.

A combinação linear Melbourne-Wübbena, desenvolvida independentemente por Melbourne (1985) e Wübbena (1985), combina observações de fase e código nas duas frequências. Esta combinação elimina o efeito da ionosfera, geometria, relógios e troposfera, e o que resta é um termo devido à ambiguidade e o ruído (DACH *et al.*, 2007), de acordo com a equação (FOULGER *et al.*, 1993):

$$\Phi_6 = n_1\Phi_1 + n_2\Phi_2 + n_3P_1 + n_4P_2 \quad (2.50)$$

onde os números reais são obtidos por:

$$n_1 = \frac{f_1}{f_1 - f_2} ; n_2 = -\frac{f_2}{f_1 - f_2} ; n_3 = -\frac{f_1}{f_1 + f_2} ; n_4 = -\frac{f_2}{f_1 + f_2} \quad (2.51)$$

2.6 PERDAS DE CICLO

Conforme foi visto na seção 2.3, no início de um levantamento, o receptor mede a parte fracionária da fase e começa a contagem do número de ciclos inteiros. Para uma determinada época, a fase acumulada é a soma da parte fracionária com o número de ciclos, contado desde a época inicial. Porém o número de ciclos inteiros entre o satélite e o receptor (ambiguidade) é desconhecido, mas ele permanece constante desde que não ocorra perda de sinal. Se isto ocorrer, a contagem do número de ciclos é reinicializada, e a esse acontecimento se dá o nome de *perdas de ciclo* (ingl. *cycle slip*).

Segundo Seeber (1993, p. 271), quando ocorrem perdas de ciclo, a fase apresenta uma variação repentina do número inteiro de ciclos, porém a parte fracionária não sofre mudança. As perdas de ciclo podem ser de alguns poucos ou milhões de ciclos. O mesmo autor apresenta duas razões principais para a ocorrência desse fenômeno:

- i. dependente de observações: causada por obstruções, ruído do sinal e baixa elevação do satélite;
- ii. dependente do receptor: causada por sinais fracos, inclinação da antena e processamento do sinal.

Garnés (2001, p. 45) afirma que perdas de ciclo podem ter também como causa o multicaminho, a partir do momento em que este atinge valores maiores que 4,8 e 6,1 cm, valores estes que representam a quarta parte do comprimento de onda das portadoras L_1 e L_2 respectivamente.

Para a detecção e correção de perdas de ciclo é necessário determinar o instante onde ele ocorreu e a sua dimensão. Desta forma, a correção é realizada para todas as épocas posteriores e por uma quantidade constante.

2.7 SUAVIZAÇÃO DA PSEUDODISTÂNCIA

As primeiras investigações sobre a suavização da pseudodistância foram conduzidas por Hatch (1982). Aplicações e melhoramentos foram propostos mais tarde pelo próprio Hatch e outros autores (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 1994, p. 96). A suavização da pseudodistância do código é um processo que combina as não ambíguas, porém imprecisas medidas dos códigos, com as precisas, no entanto, ambíguas medidas de fase das ondas portadoras. A idéia consiste em aproveitar o baixo ruído das medidas de fase, de poucos milímetros, para reduzir o ruído das medidas do código, que é de alguns metros.

A equação recursiva que permite a obtenção da pseudodistância suavizada \tilde{P} para a portadora L_1 e L_2 em uma época k , pode ser dada por (HATCH, 1986, p. 1294):

$$\tilde{P}_{1,k} = \frac{1}{k} P_{1,k} + \frac{k-1}{k} \left[\tilde{P}_{1,k-1} + (\Phi_{1,k} - \Phi_{1,k-1}) \right] \quad (2.52)$$

$$\tilde{P}_{2,k} = \frac{1}{k} P_{2,k} + \frac{k-1}{k} \left[\tilde{P}_{2,k-1} + (\Phi_{2,k} - \Phi_{2,k-1}) \right] \quad (2.53)$$

com a condição inicial que a pseudodistância suavizada, na primeira época, é igual ao da pseudodistância original: $\tilde{P}_{1,1} = P_{1,1}$.

Teunissen (1991) afirma que a pseudodistância suavizada na época k é uma combinação linear da pseudodistância na época k com peso $1/k$, e a pseudodistância predita na época k com peso $(k-1)/k$. A pseudodistância predita, indicada pelo termo entre colchetes (nas equações 2.52 e 2.53), é baseada na diferença de fase entre a época k e $k-1$. O mesmo autor ainda demonstra que esta equação não pode ser rigorosamente considerada como um estimador de mínimos quadrados recursivos, devido a suposição implícita que a variância das observações de fase é zero.

É importante observar que, no filtro de Hatch, uma discrepância acontece devido à divergência ionosférica. Esse efeito ocorre devido aos sinais opostos da ionosfera nas equações 2.1 e 2.3, para a frequência L_1 (ou equações 2.2 e 2.4 para

L_2), causando uma discrepância igual a duas vezes a diferença da refração ionosférica entre épocas consecutivas. O filtro de Hatch, de forma como apresentado nas equações 2.52 e 2.53, não consegue lidar adequadamente com esse efeito, pois cada vez que o índice k é incrementado, com o decorrer do tempo, as discrepâncias vão se acumulando gradualmente. Este problema pode ser resolvido introduzindo um termo que compensa esse efeito (KEE *et al.*, 1996, p. 489).

Introduzindo um termo que compensa o efeito da divergência, tem-se as seguintes equações (KEE *et al.*, 1996, p. 489):

$$\tilde{P}_{1,k} = \frac{1}{k}P_{1,k} + \frac{k-1}{k} \left[\tilde{P}_{1,k-1} + (\Phi_{1,k} - \Phi_{1,k-1}) + \frac{2}{\gamma-1} [(\Phi_{1,k} - \Phi_{1,k-1}) - (\Phi_{2,k} - \Phi_{2,k-1})] \right] \quad (2.54)$$

$$\tilde{P}_{2,k} = \frac{1}{k}P_{2,k} + \frac{k-1}{k} \left[\tilde{P}_{2,k-1} + (\Phi_{2,k} - \Phi_{2,k-1}) + \frac{2\gamma}{\gamma-1} [(\Phi_{1,k} - \Phi_{1,k-1}) - (\Phi_{2,k} - \Phi_{2,k-1})] \right] \quad (2.55)$$

2.8 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

Quando os valores observados ajustados (L_a) podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados (X_a), isto é, quando se verifica o modelo matemático (GEMAEL, 1994, p. 117):

$$L_a = F(X_a) \quad (2.56)$$

o ajustamento é realizado por meio dos mínimos quadrados. O modelo matemático linearizado do método das equações de observações é dado pela equação:

$$V = AX - L_b \quad (2.57)$$

onde:

V : vetor dos resíduos;

- A : matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros,
conforme: $A = \partial F / \partial X$;
- X : vetor dos parâmetros;
- L_b : vetor das observações.

Monico (2008, p. 245) esclarece que se o vetor V representa a natureza probabilística da variabilidade das medidas, é de se esperar que sua variabilidade tenha média zero, então, a esperança matemática ($E\{.\}$) do vetor dos resíduos é dada por:

$$E\{V\} = 0 \quad (2.58)$$

A variabilidade das observações, representada pela matriz coeficientes de peso, pode ser escrita de acordo com a equação 2.59, onde $D\{.\}$ representa o operador dispersão (TEUNISSEN, 2001, p. 19):

$$D\{L\} = Q_L \quad (2.59)$$

onde Q_L representa a matriz dos coeficientes de peso.

Assim, o modelo para as equações de observação assume a seguinte forma (TEUNISSEN, 2001, p. 19):

$$E\{L\} = AX \ ; \ D\{L\} = Q_L \quad (2.60)$$

Considerando que as observações tem diferentes precisões, a matriz dos pesos P é definida como (GEMAEL, 1994, p. 72):

$$P = Q_L^{-1} = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1} \quad (2.61)$$

onde:

- σ_0^2 : variância da unidade de peso *a priori*;
- Σ_{L_b} : matriz variância-covariância das observações.

Minimizando a forma quadrática fundamental do método dos mínimos quadrados (GEMAEL, 1994, 119):

$$\phi = V^T P V = (AX + L)^T P (AX + L) = \min \quad (2.62)$$

chega-se à matriz (N) e ao vetor (U) das equações normais. Sendo n o número de equações de observação e u o número de parâmetros, tem-se:

$$\begin{aligned} {}_u N_u &= {}_u A_{n \ n}^T P_{n \ n} A_u \\ {}_u U_1 &= {}_u A_{n \ n}^T P_{n \ n} L_{b1} \end{aligned} \quad (2.63)$$

Desde que a matriz quadrada N seja não singular, isto é, admita inversa ordinária, o vetor dos parâmetros X é obtido por:

$${}_u X_1 = {}_u N_u^{-1} {}_u U_1 \quad (2.64)$$

A variância da unidade de peso *a posteriori* definida como (DALMOLIN, 2004, p. 99):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{{}_1 V_{n \ n}^T P_{n \ n} V_1}{n - u} \quad (2.65)$$

onde a diferença $(n-u)$ é denominada *graus de liberdade*. Finalmente, a matriz variância-covariância do vetor dos parâmetros é dada por:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \quad (2.66)$$

DALMOLIN (2004, p. 133) esclarece que a variância da unidade de peso *a posteriori* serve para testar a qualidade do ajustamento e dos valores estimados. Caso ela não passe no teste, existe a possibilidade da presença de erros grosseiros ou a estimativa das variâncias das observações não foi adequada.

No posicionamento por ponto onde se deseja uma solução para cada época, o procedimento descrito anteriormente para o ajustamento é conveniente. Para o caso em que se deseja obter uma solução única para um conjunto de observações obtidas em diferentes épocas, pode-se aplicar o ajustamento em lote ou o recursivo. Monico (2008, p. 244) esclarece que no processamento em lote todas as observações são ajustadas de forma simultânea e Teunissen (2001, p. 43) explica que o ajustamento recursivo é um método que permite a atualização da solução, a partir de novas observações, sem que seja necessário armazenar informações de todas as épocas anteriores.

Na sequência será apresentado o ajustamento recursivo baseado no desenvolvimento proposto por Teunissen (2001, p. 46-49). Considerando um conjunto de observações $i = 1...k$, consideradas não correlacionadas, forma-se o sistema:

$$E \begin{Bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_k \end{Bmatrix} X ; D \begin{Bmatrix} L_0 \\ L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_0 & & & & \\ & Q_1 & & & \\ & & Q_2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & Q_k \end{Bmatrix} \quad (2.67)$$

Para a época arbitrária k , a solução do sistema e a matriz dos coeficientes, podem ser escritas de acordo com as seguintes equações:

$$X_k = \left(\sum_{i=0}^k A_i^T Q_i^{-1} A_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=0}^k A_i^T Q_i^{-1} L_i \right) = (N_0 + N_1 + \dots + N_k)^{-1} (U_0 + U_1 + \dots + U_k) \quad (2.68)$$

$$Q_{X_k} = \left(\sum_{i=0}^k A_i^T Q_i^{-1} A_i \right)^{-1} = (Q_0 + Q_1 + \dots + Q_k)^{-1} \quad (2.69)$$

Excluindo as observações da época k , a solução e sua matriz variância-covariância assume a seguinte forma:

$$X_{k-1} = \left(\sum_{i=0}^{k-1} A_i^T Q_i^{-1} A_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=0}^{k-1} A_i^T Q_i^{-1} L_i \right) \quad (2.70)$$

$$Q_{X_{k-1}} = \left(\sum_{i=0}^{k-1} A_i^T Q_i^{-1} A_i \right)^{-1} \quad (2.71)$$

Invertendo a equação 2.71 (de acordo com 2.72) e multiplicando por 2.70, depois de algumas manipulações se chega à equação 2.73:

$$\sum_{i=0}^{k-1} A_i^T Q_i^{-1} A_i = Q_{X_{k-1}}^{-1} \quad (2.72)$$

$$\sum_{i=0}^{k-1} A_i^T Q_i^{-1} L_i = Q_{X_{k-1}}^{-1} X_{k-1} \quad (2.73)$$

A partir das equações anteriores, pode-se escrever as próximas duas para a época k :

$$X_k = (Q_{X_{k-1}}^{-1} + A_k^T Q_k^{-1} A_k)^{-1} (Q_{X_{k-1}}^{-1} X_{k-1} + A_k^T Q_k^{-1} L_k) \quad (2.74)$$

$$Q_{X_k} = (Q_{X_{k-1}}^{-1} + A_k^T Q_k^{-1} A_k)^{-1} \quad (2.75)$$

Teunissen (2001, p. 47) afirma que as equações 2.74 e 2.75 mostram que não existe a necessidade de se armazenar todas as observações anteriores à época $k-1$ para o cálculo da solução na época k . O vetor dos parâmetros para a época k pode ser calculado diretamente a partir da solução anterior (X_{k-1} e Q_{k-1}) e das observações da época k (L_k). Segundo o mesmo autor, esta é a essência do ajustamento sequencial.

A inicialização do processo recursivo é realizado por meio do cálculo da solução inicial:

$$X_0 = (A_0^T Q_0^{-1} A_0)^{-1} (A_0^T Q_0^{-1} L_0) \quad (2.76)$$

$$Q_{X_0} = (A_0^T Q_0^{-1} A_0)^{-1} \quad (2.77)$$

Uma vez conhecida a solução inicial (X_0), o vetor X_k pode ser calculado em função do valor anterior X_{k-1} . Uma equação recursiva alternativa é dada a seguir:

$$X_k = X_{k-1} + Q_{X_k} A_k^T Q_k^{-1} (L_k - A_k X_{k-1}) \quad (2.78)$$

$$Q_{X_k} = (Q_{X_{k-1}}^{-1} + A_k^T Q_k^{-1} A_k)^{-1} \quad (2.79)$$

Teunissen (2001, p. 48) afirma que o termo $A_k X_{k-1}$ (de 2.78) pode ser interpretado como um valor predito da observação L_k , enquanto que a diferença $L_k - A_k X_{k-1}$ como o resíduo resultante entre o valor da observação na época atual e o predito.

Definindo a matriz ganho K como sendo:

$$K_k = (Q_{X_{k-1}}^{-1} + A_k^T Q_k^{-1} A_k)^{-1} A_k^T Q_k^{-1} \quad (2.80)$$

e empregando os valores iniciais obtidos em 2.76 e 2.77, as equações para a estimativa recursiva podem ser expressas como:

$$X_k = X_{k-1} + K_k (L_k - A_k X_{k-1}) \quad (2.81)$$

$$K_k = Q_{X_k} A_k^T Q_k^{-1} \quad (2.82)$$

$$Q_{X_k} = (Q_{X_{k-1}}^{-1} + A_k^T Q_k^{-1} A_k)^{-1} \quad (2.83)$$

Até o presente momento o modelo foi considerado como sendo linear. Para o caso de modelos não lineares, estes podem ser substituídos por um modelo linearizado, onde um valor aproximado deve ser conhecido. O modelo linearizado, em relação a ΔX , assume a seguinte forma (TEUNISSEN, 2001, p. 64):

$$E \begin{Bmatrix} \Delta L_0 \\ \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \vdots \\ \Delta L_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial_X A_0(X^0) \\ \partial_X A_1(X^0) \\ \partial_X A_2(X^0) \\ \vdots \\ \partial_X A_k(X^0) \end{Bmatrix} \Delta X ; D \begin{Bmatrix} \Delta L_0 \\ \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \\ \vdots \\ \Delta L_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \ddots \\ Q_k \end{Bmatrix} \quad (2.84)$$

onde:

X^0 : valor aproximado;

ΔL_i : $\Delta L_i = L_i - A(X^0)$;

ΔX_i : $\Delta X_i = X_i - X^0$;

$\partial_X A_i(X^0)$: matriz das derivadas parciais em relação a X^0 .

2.9 POSICIONAMENTO POR PONTO

O posicionamento por ponto é caracterizado por empregar apenas um receptor GPS, isto é, não necessita que dois ou mais receptores operem simultaneamente devido a uma característica intrínseca do próprio método que consiste em utilizar observações não-diferenciadas.

Para Monico (2000b, p. 40) o termo *posicionamento por ponto* normalmente refere-se à obtenção da posição (coordenadas tridimensionais) de uma estação a partir de observações de pseudodistância do código C/A, fixando a órbita e demais parâmetros dos satélites aos valores contidos nas mensagens de navegação.

Segundo Divis (2000, p. 16) até o dia 1º de maio de 2000 a precisão planimétrica esperada para o posicionamento por ponto era de 100 metros enquanto que a vertical de 150 metros, com 95% de probabilidade. Segundo o mesmo autor, com o desligamento parcial da SA (ingl. *Selective Availability*), à meia noite do dia 2 de maio de 2000, a precisão do posicionamento com receptores que operam apenas com o código C/A é da ordem de 15-25 metros em tempo real. A figura 2.5 mostra as discrepâncias planimétricas e altimétricas calculadas para a estação PARA (estação da RBMC desativada e substituída pela estação UFPR) no dia 2 de maio de 2002, antes e depois do desligamento da SA, ocorrido às 4h (TUC). Os

resultados mostram uma melhora significativa da acurácia do posicionamento após o desligamento da SA.

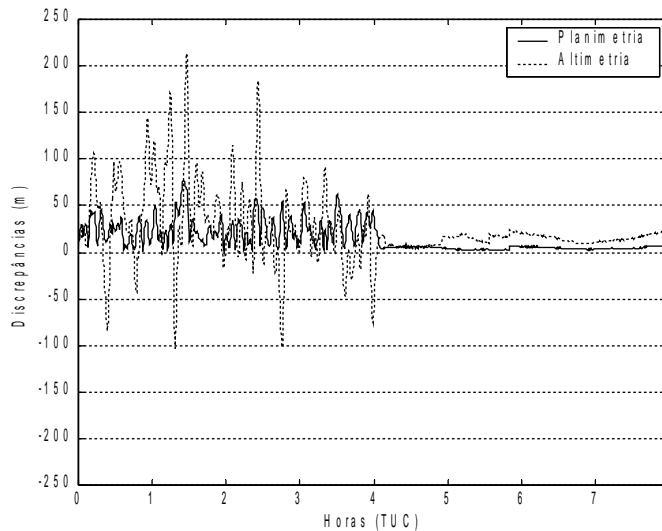


FIGURA 2.5 – DISCREPÂNCIAS COM E SEM A SA ATIVADA

NOTA: Estação PARA (substituída pela estação UFPR), 2 de maio de 2000 (123/2000)

Os resultados obtidos para a estação PARA mostram que mesmo depois do desligamento parcial da SA, a acurácia obtida por este método não atinge o nível exigido para aplicações geodésicas devido a presença de diversos erros. Monico (2000, p. 185) destaca que os principais erros que afetam este método estão relacionados com a qualidade (precisão) da observável utilizada (pseudodistância) e a acurácia dos parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação, bem como, os advindos da refração atmosférica (troposférica e ionosférica), multicaminho, entre outros.

Negligenciando os erros de órbita, refração atmosférica, e erros dependentes da estação (multicaminho, PCO/PCV e resíduos de efeitos aleatórios ou parâmetros não modelados), a pseudodistância do código para uma determinada época pode ser modelada segundo a equação:

$$P_r^j = \rho_r^j + c\delta t_r - c\delta t^j \quad (2.85)$$

O último termo, que representa o erro do relógio do satélite, é calculado pela equação 2.5, empregando os coeficientes do polinômio contidos nas mensagens de navegação.

A distância geométrica entre o satélite j e a estação r é calculada em função das coordenadas geocêntricas do satélite X^j, Y^j, Z^j , na época de transmissão do sinal, e as coordenadas geocêntricas da estação X_r, Y_r, Z_r , no tempo de recepção do sinal, onde o tempo de propagação do sinal deve ser considerado e correções devido ao movimento de rotação da Terra devem ser aplicadas (XU, 2003, p. 34):

$$\rho_r^j = \sqrt{(X^j - X_r)^2 + (Y^j - Y_r)^2 + (Z^j - Z_r)^2} \quad (2.86)$$

O erro do relógio do receptor, por sua vez, é um parâmetro que deve ser estimado no ajustamento assim como as coordenadas da estação. Em se tratando do número de incógnitas, observa-se que em cada época deve-se determinar quatro parâmetros: três coordenadas para a estação e o erro do relógio do receptor. Por isso são necessários quatro satélites para a solução do sistema. Se mais satélites forem rastreados, constata-se que o número de parâmetros permanece o mesmo, e a redundância aumenta.

Verifica-se que o termo ρ_r^j (equação 2.86), que contém incógnitas, é uma função não linear. Esta função é substituída por uma que pode ser expandida pela série de Taylor, em relação a um ponto aproximado. Normalmente somente o termo linear da série é levado em consideração.

Denotando por $a_{X_r}^j, a_{Y_r}^j, a_{Z_r}^j$ as derivadas parciais da função em relação aos parâmetros X_r, Y_r, Z_r , depois de algumas manipulações se chega à equação da pseudodistância linearizada:

$$P_{r0}^j - \rho_{r0}^j + c\delta t^j = a_{X_r}^j \Delta X_r + a_{Y_r}^j \Delta Y_r + a_{Z_r}^j \Delta Z_r + c\delta t_r \quad (2.87)$$

onde o vetor dos parâmetros X , transposto, pode ser escrito como:

$$X^T = [\Delta X_i \quad \Delta Y_i \quad \Delta Z_i \quad \delta t_i] \quad (2.88)$$

2.10 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

Para contornar a limitação, em termos de acurácia, proporcionada pelo posicionamento por ponto convencional, surgiu o posicionamento por ponto preciso. Segundo Wübbena *et al.* (2005), o modelo matemático do PPP emprega observações não-diferenciadas, de dupla frequência, e aplica dentre outras correções, órbitas e erro do relógio dos satélites precisos. O erro do relógio do receptor e o erro troposférico são estimados no ajustamento, enquanto que o erro ionosférico é reduzido por meio da combinação linear livre da ionosfera.

Esta combinação normalmente é realizada no PPP devido ao fato dos modelos atuais de ionosfera disponíveis não serem suficientemente acurados (WÜBBENA *et al.*, 2005). Como a combinação livre da ionosfera não é baseada em coeficientes inteiros, naturalmente as ambiguidades não serão números inteiros, por isso, um longo tempo de observação é necessário para que as ambiguidades se estabilizem. Faustino (2006, p. 75) reportou que em levantamentos estáticos, foram necessários 30 minutos para que as ambiguidades convergissem.

A combinação linear livre da ionosfera para observações do código e fase da onda portadora podem ser escritas em função dos números n_1 e n_2 definidos anteriormente (seção 2.5), conforme as equações simplificadas (GAO e CHEN, 2004, p. 96):

$$P_{r,3}^j = \rho_r^j + c\delta t_r + T_r^j + M_{r,3}^j + \varepsilon_{r,P_1} \quad (2.89)$$

$$\varphi_{r,3}^j = \rho_r^j + c\delta t_r + T_r^j + \lambda_3 N_{r,3}^j + m_{r,3}^j + \varepsilon_{r,\varphi_3} \quad (2.90)$$

onde:

P_3 : combinação linear livre da ionosfera para o código: $P_3 = n_1 P_1 - n_2 P_2$

φ_3 : combinação linear livre da ionosfera para a fase da onda

portadora, na unidade métrica: $\varphi_3 = n_1 \varphi_1 - n_2 \varphi_2$.

Os demais termos, como comprimento de onda, ambiguidade, multicaminho resíduos aparecem com o índice 3 pois estão relacionadas com a combinação livre da ionosfera.

Os erros referentes à órbita (coordenadas) e relógio dos satélites não aparecem nas equações 2.89 e 2.90 porque foram reduzidos a valores negligenciáveis ao se utilizar produtos precisos do IGS, ou de algum de seus centros de análise. Como apresentado no quadro 2.1, produtos finais e rápidos são adequados para o PPP, pois tanto as coordenadas quanto os relógios foram estimados com alta precisão. Para aplicações em tempo real serviços como o do IGDG, que fornecem órbita e relógio precisos em tempo quase real, podem ser empregados. Kechine *et al.* (2004) empregaram correções IGDG e mostraram que no posicionamento por ponto preciso estático a média das coordenadas obtidas em diversos dias apresentaram uma concordância de 1 a 2 cm em relação aos valores conhecidos.

Para reduzir a influência da troposfera no PPP, o atraso troposférico para a parte úmida pode ser modelada como um parâmetro a ser estimado junto aos demais parâmetros no ajustamento (SHEN e GAO, 2002, p. 4). Jensen e Ovstedal (2008) comparam três métodos para correção do atraso troposférico para o posicionamento por ponto preciso: os modelos Saastamoinen, UNB3 (da Universidade de New Brunswick, Canadá), e de Previsão Numérica de Tempo (ingl. *Numerical Weather Prediction – NWP*). Os autores concluíram que os melhores resultados foram obtidos com o modelo Saastamoinen quando foram introduzidos parâmetros meteorológicos extraídos de NWP para o local onde a estação se encontrava.

O emprego de antenas calibradas reduz o problema referente ao deslocamento e à variação do centro de fase da antena do receptor. O multicaminho pode ser reduzido escolhendo estações livres de superfícies refletoras nas proximidades, ou estações que operem com antenas projetadas para minimizar esse efeito, como as do tipo *choke ring*.

Segundo Kouba e Héroux (2001, p. 16) na tentativa de combinar a posição do satélite e relógio precisos (da ordem de mm), com a combinação linear da fase (precisão milimétrica também), é necessário levar em conta alguns efeitos que não são considerados no modelo da pseudodistância e nem do posicionamento diferencial. Dentre os efeitos que devem ser considerados, tem-se: *offset* da antena

do satélite, *phase wind-up*, marés terrestres, carga oceânica e parâmetros de rotação da Terra. Tanto estes, quanto outros erros presentes no posicionamento GPS foram brevemente descritos na seção 2.4.

No ajustamento de observações tanto o modelo funcional quanto o modelo estocástico devem ser corretamente definidos. Vários métodos podem ser empregados para o modelo estocástico. Os mais simples consideram, além da variância da observação, somente o ângulo de elevação do satélite na forma: $1/\sin(E)$. Modelos mais sofisticados como aqueles baseados na relação sinal ruído (ingl. *Signal to Noise Ratio – SNR*) também podem ser utilizados. No Instituto de Geodésia de Karlsruhe, da Universidade de Karlsruhe, tem sido desenvolvido um modelo estocástico baseado na relação sinal ruído. LUO *et al.* (2007) afirmam que o modelo padrão de peso dependente da elevação do satélite é adequado para sinais GNSS sem distúrbios, quando existe uma forte correlação entre a qualidade do sinal e a elevação do satélite. Os mesmos autores propõem um modelo de peso diretamente relacionado com a qualidade das observações, baseado no SNR. Nos experimentos realizados, os autores observaram uma melhora de até 25% na estimativa de parâmetros troposféricos, quando comparado àqueles obtidos por meio do modelo padrão de peso.

Satirapod e Luansang (2008) empregaram três modelos estocásticos diferentes para um posicionamento PPP, sendo eles: peso igual para todas as observações; peso diferente para cada observação em função da elevação do satélite; e, empregando o método MINQUE (ingl. *Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimator*). Os resultados mostraram que a aplicação do método MINQUE proporcionou melhores resultados, tanto para as componentes planimétricas quanto as altimétricas. Este método assume que todas as observações são estatisticamente dependentes e possuem diferentes variâncias, e está baseado no princípio que os resíduos oriundos do ajustamento de observações representam as mesmas características dos erros verdadeiros. Neste caso, o período de observação deve ser grande suficiente para que todos os erros sistemáticos sejam removidos. Assim, a precisão de cada observação está relacionada com o resíduo gerado pelo ajustamento.

Baseados nas equações apresentadas anteriormente (equações 2.89 e 2.90), o posicionamento por ponto preciso contém basicamente os seguintes parâmetros: três coordenadas da estação; o erro do relógio do receptor; um

parâmetro que corresponde ao atraso zenital troposférico para a componente úmida e os termos de ambiguidades flutuantes (livre da ionosfera), tantos quanto for o número de satélites observados. O vetor dos parâmetros X pode ser escrito de forma genérica, para n satélites, como:

$$X^T = \left[X_r \quad Y_r \quad Z_r \quad \delta t_r \quad T_w^z \quad N_{3,r}^n \right] \quad (2.91)$$

Segundo Kouba e Héroux (2001, p. 20), a convergência do PPP depende, dentro outros fatores, do sinergismo entre as observações de pseudodistância e fase da onda portadora. Na época inicial, devido ao não conhecimento das ambiguidades, a solução conta inteiramente com as observações de pseudodistância, refletindo a qualidade do posicionamento. Com o decorrer do tempo as observações de fase são adicionadas à solução e se observa que as ambiguidades da combinação livre da ionosfera e as componentes da posição da estação (estático) convergem para um valor constante. A figura 2.6 mostra um dos resultados obtidos por Kouba e Héroux (2001) sobre a estação ALGO (Algonquin Park, Canadá) no dia 10/12/1999. Os resultados são para um dia inteiro de observações, com soluções a cada 15 minutos. Este é um típico resultado de um processamento PPP, onde se nota que no início a solução apresenta maiores discrepâncias, em torno de 50 cm no exemplo, e decorridas duas a três horas de observações ocorre a convergência da solução, quando as discrepâncias foram inferiores a 10 cm.

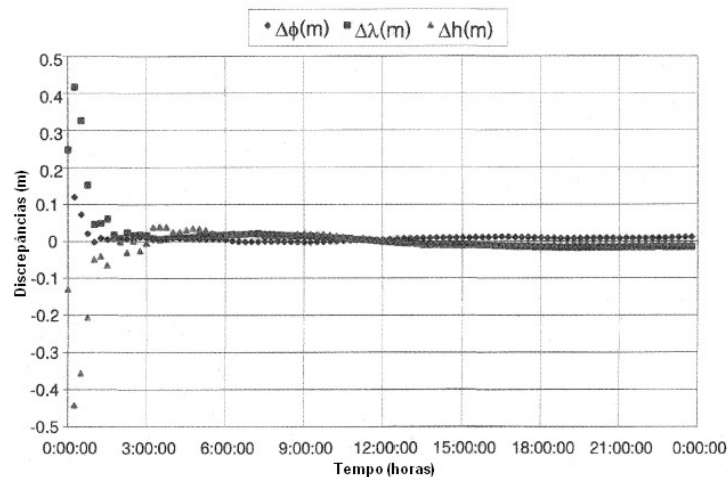


FIGURA 2.6 – CONVERGÊNCIA DA SOLUÇÃO PPP (ESTAÇÃO ALGO)
 FONTE: Adaptado de Kouba e Héroux (2001, p. 20)

Gao e Chen (2004) apresentam resultados obtidos de levantamentos estáticos, alcançando acurácia subcentimétrica em tempo real (após a convergência da solução). Para levantamentos cinemáticos eles alcançaram acurácia ao nível do centímetro em seus experimentos.

Atualmente, estão disponíveis alguns serviços para processamento PPP pela *internet*. O Serviço Geodésico Canadense (ingl. *Canadian Geodetic Service*) do *Natural Resources Canada*, é provedor do Sistema de Referência Espacial Canadense (ingl. *Canadian Spatial Reference System – CSRS*), e disponibiliza um serviço *on-line* para usuários GPS denominado CSRS-PPP (NRCan, 2009). Este serviço permite ao usuário obter posições acuradas por meio de observações de apenas um receptor GPS, as quais são enviadas via rede. O serviço processa observações de receptores de uma ou dupla frequência, no modo estático ou cinemático.

Recentemente, o IBGE disponibilizou em seu sítio na *internet* (<http://www.ppp.ibge.gov.br/>) um serviço PPP, denominado IBGE-PPP, fazendo uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP. O IBGE-PPP processa dados GPS que foram coletados no modo estático ou cinemático de receptores de uma ou duas frequências. Ele permite aos usuários de GPS obterem coordenadas no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS2000 (SIRGAS, 2008) e no ITRF. Contudo, o sistema só opera com observações GPS coletadas após o dia 25 de fevereiro de 2005, quando o SIRGAS2000 foi adotado oficialmente no Brasil (IBGE, 2009).

Um outro serviço PPP *on-line* é o GAPS (*GPS Analysis and Positioning Software*), desenvolvido na Universidade de New Brunswick, Canadá (<http://gaps.gge.unb.ca/ppp/>). Para maiores detalhes consultar Leandro *et al.* (2007) e Leandro (2009).

3 IONOSFERA

A estrutura da atmosfera pode ser descrita como camadas concêntricas com propriedades físicas e químicas diferentes. Várias subdivisões são possíveis, e geralmente são feitas de acordo com alguma característica particular de interesse (SEEBER, 2003, p. 48). Uma das formas, de especial importância para o posicionamento GPS, é segundo a propagação do sinal na atmosfera (figura 3.1). O sinal oriundo de um satélite GPS é afetado de forma diferente ao atravessar a ionosfera e a troposfera. Neste capítulo serão descritos brevemente alguns aspectos relacionados com a ionosfera, tais como: formação da ionosfera, estrutura, distúrbios, além de alguns modelos para correção ionosférica.

Altitude [km]	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação	Técnico
100000		Protonosfera			
10000	Termosfera	-----	Magnetosfera	Ionosfera	Atmosfera Superior
1000		Ionosfera			
100	Mesosfera	-----	Dinamosfera	-----	Atmosfera Inferior
	Estratosfera	-----		-----	
10	Troposfera	Neutrosfera		Troposfera	

FIGURA 3.1 – POSSÍVEIS SUBDIVISÕES DA ATMOSFERA TERRESTRE
 FONTE: Adaptado de Seeber (2003, p. 48)

3.1 PROCESSOS DE IONIZAÇÃO

O principal processo de produção iônica é a absorção de radiação solar na faixa espectral do extremo ultravioleta (EUV) e dos raios X (KIRCHHOFF, 1991, p. 75). McNamara (1991) apud Webster (1993, p. 23), esclarece que a radiação eletromagnética solar ao incidir sobre a atmosfera neutra produz uma grande quantidade de íons e elétrons livres através do processo denominado fotoionização, formando assim a ionosfera. Webster (1993, p. 23) aponta a radiação cósmica, que

consiste em partículas carregadas provenientes do Sol e do espaço, como sendo um segundo agente de ionização, porém de menor importância, com exceção de regiões de baixas latitudes.

Outro processo que ocorre na ionosfera é a recombinação, no qual os íons e elétrons livres se juntam, produzindo átomos neutros e moléculas (WEBSTER, 1993, p. 23). McNamara (1991) apud Matsuoka (2007, p. 36) afirma que a recombinação, processo inverso à fotoionização, é o principal processo pelo qual elétrons livres são perdidos na parte superior da atmosfera.

Na parte mais baixa da ionosfera, elétrons são perdidos em um processo de junção (ingl. *attachment*) em que elétrons se juntam a átomos neutros, resultando em íons de carga negativa (MATSUOKA, 2007, p. 37; WEBSTER, 1993, p. 23).

Enquanto os processos de recombinação e junção ocorrem de forma contínua, a fotoionização ocorrerá somente na presença da energia no EUV proveniente do Sol, isto é, enquanto o astro estiver acima do horizonte. Assim, o efeito desses três efeitos causa a variação da densidade de elétrons (número de elétrons por metro cúbico) a qual é função do tempo, local, da atividade solar e geomagnética (WEBSTER, 1993, p. 24).

3.2 ESTRUTURA DA IONOSFERA

Como visto anteriormente, a ionosfera é uma camada que se estende de 50 km a aproximadamente 1.000 km de altitude. O limite superior da ionosfera não é muito bem definido, tanto é que Camargo (1999, p. 12) esclarece que partes ionizadas da ionosfera se estendem ao espaço interplanetário e se fundem com o vento solar e com o plasma interplanetário, com decréscimo da densidade de elétrons.

A ionosfera é usualmente subdividida em três regiões em função da densidade de elétrons, nomeadas pelas letras D, E e F (F1 e F2). A figura 3.2 exemplifica essa divisão e mostra a densidade de elétrons em cada região. Kirchhoff (1991, p. 76) afirma que as alturas das densidades numéricas devem ser interpretadas algo como “em torno de”, pois os valores podem variar de acordo com inúmeros fatores.

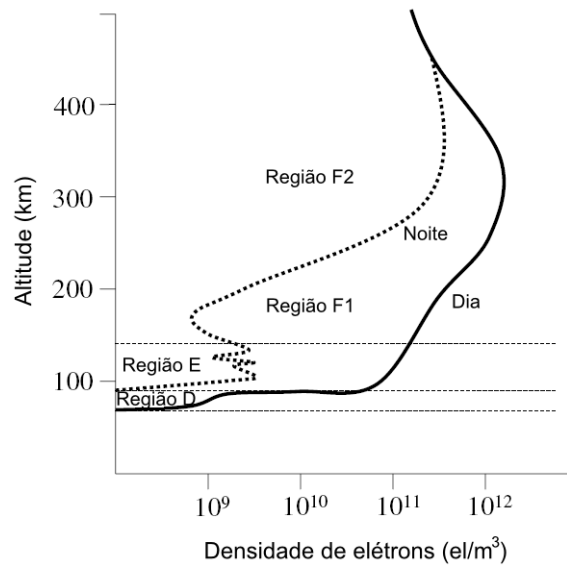


FIGURA 3.2 – SUBDIVISÃO DA IONOSFERA
 FONTE: Adaptado de Odijk (2002, p. 72)

A região D é a mais baixa da ionosfera, chegando a aproximadamente 90 km de altitude. A fonte primária de ionização é a radiação solar, mas outras fontes também contribuem. A maior concentração de elétrons livres ocorre após o meio dia e é extremamente pequena ou praticamente desaparece à noite (LIU, 2004, p. 23). Valores típicos para a densidade de elétrons em regiões de latitudes médias variam de $6,1 \cdot 10^8$ a $13,1 \cdot 10^8 \text{ el}/\text{m}^3$, variando em função da atividade solar (KOMJATHY, 1997, p. 19). Mendes (1999, p. 28) afirma que sob condições normais, o grau de ionização nesta camada não é forte o suficiente para interferir na propagação de ondas de rádio.

A próxima região, denominada região E, se estende de 90 a 140 km (MENDES, 1999, p. 28). O comportamento desta camada quase inteiramente depende do nível da atividade solar e do ângulo zenital do Sol (KOMJATHY, 1997, p. 19). Ela é quase ausente durante a noite, pois a maioria dos elétrons se recombina com os íons positivos (MENDES, 1999, p. 28). Valores típicos para regiões de latitude média são da ordem de $1,3 \cdot 10^{11}$ a $1,7 \cdot 10^{11} \text{ el}/\text{m}^3$ (KOMJATHY, 1997, p. 19). Dentro desta camada, uma fina camada ionosférica com uma concentração de elétrons maior é algumas vezes observado, conhecida como camada esporádica E (E_s) (MENDES, 1999, p. 28). Segundo Wild (1994, p. 28), esta fina camada pode ser observada entre altitudes que variam de 100 a 120 km.

A camada mais alta da ionosfera é a camada F, iniciando-se a uma altitude de aproximadamente 140 km. Ela envolve duas regiões de características distintas.

A camada F_1 , entre as altitudes 140 km e 200 km, é a camada inferior e é observada somente durante o dia, pois segundo Komjathy (1997, p. 19) a densidade de elétrons é controlada pelo ângulo zenital do Sol. A principal fonte de ionização é a radiação solar no extremo ultravioleta, e para regiões de latitudes médias ao meio dia a densidade de elétrons atinge valores entre $2,3 \cdot 10^{11}$ a $3,3 \cdot 10^{11}$ el/m^3 (KOMJATHY, 1997, p. 19). A camada F_2 é a camada de maior densidade de elétrons, chegando a alcançar $1 \cdot 10^{12}$ el/m^3 em altitudes entre 250 e 500 km, mas embora essa camada não desapareça durante a noite, a densidade de elétrons decresce neste período (MENDES, 1999, p. 29). Wild (1994, p. 28) afirma que enquanto a camada F_1 apresenta um comportamento mais ou menos regular, o comportamento da camada F_2 é bastante irregular.

3.3 REGIÕES GEOGRÁFICAS DA IONOSFERA

Em relação às regiões geográficas da ionosfera, pode-se dividir a Terra basicamente em três regiões distintas, assim denominadas: equatorial, de médias latitudes e de altas latitudes, conforme a figura 3.3.

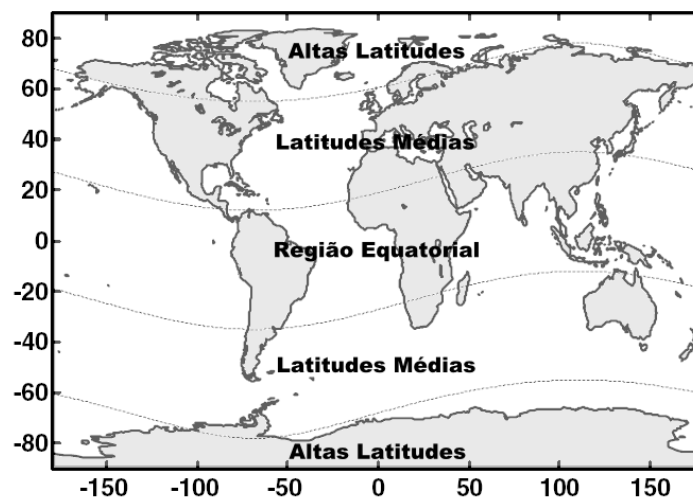


FIGURA 3.3 – DIVISÃO DA TERRA DE ACORDO COM AS REGIÕES GEOMAGNÉTICAS
FONTE: Adaptado de Odijk (2002, p. 73)

A região equatorial está compreendida entre as latitudes geomagnéticas aproximadas de 30°N e 30°S (MATSUOKA, 2007, p. 73). O mesmo autor ainda indica uma subdivisão desta região em uma equatorial propriamente dita (entre 5°N e 5°S) e outras de baixas latitudes (entre 5° e 30°).

A região equatorial é caracterizada por apresentar os maiores picos de densidade de elétrons, onde um dos maiores efeitos são devido à cintilação (KOMJATHY, 1997, p. 22). Segundo Wanninger (1993) apud Matsuoka (2007, p. 74), a atividade da ionosfera nessa região é altamente correlacionada com a hora local, iniciando normalmente por volta das 6-7 horas local e alcançando sua atividade máxima as 14-15 horas local. Porém, um segundo máximo é esperado em regiões de baixa latitude perto das 21 horas local.

O efeito combinado do alto nível de radiação do sol com os campos magnéticos e elétricos da Terra resultam na elevação de elétrons e movimento ao longo de linhas de força horizontais do campo magnético. Esse efeito é conhecido como *efeito fonte* (KOMJATHY, 1997, p. 22). Quando descem, em regiões de latitude entre 10° e 20°, provocam uma alta concentração de elétrons em duas faixas, conhecida como *anomalia equatorial* (KOMJATHY, 1997, p. 22; WEBSTER, 1993, p. 31).

Regiões de latitudes médias estão localizadas aproximadamente entre 30° e 50°, nos dois hemisférios (MATSUOKA, 2007, p. 70). Esta região é a que menos varia e também apresenta menos distúrbios que as demais (KOMJATHY, 1997, p. 22).

Regiões de altas latitudes podem ser divididas em: região da calota polar, auroral e subauroral (EL GIZAWY, 2003, p. 39). A região da calota polar está em latitudes geomagnéticas acima de 75°, a região auroral entre 60° e 75°. Nessa região, o campo geomagnético domina, e suas mudanças são imprevisíveis (BRUNINI *et al.*, 2004). Devido ao fato da região de altas latitudes não ser objeto de estudo neste estudo, informações complementares podem ser obtidos na seguinte literatura: Komjathy (1997), Matsuoka (2007) e Wanninger (1993).

3.4 DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS

3.4.1 Tempestades Geomagnéticas e Ionosféricas

Distúrbios ionosféricos podem ter como causa distúrbios solares ou do campo geomagnético. No primeiro caso, os distúrbios estão diretamente ou indiretamente ligados com o Sol, enquanto que no segundo caso, a origem do evento é o Sol, no entanto as linhas do campo geomagnético é que são afetadas, causando tempestades geomagnéticas (KOMJATHY, 1997, p. 24).

Tempestades geomagnéticas normalmente ocorrem em conjunto com tempestades ionosféricas, e ambas tem a mesma causa: explosões solares (*solar flares*), corrente de vento de alta velocidade (HSSWS – *High Speed Solar Wind Stream*) oriundos dos buracos da corona (camada mais externa do Sol) e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDFs – *Sudden Disappearing Filaments*) (KOMJATHY, 1997, p. 26; MATSUOKA, 2007, p. 54-55).

Explosões solares ocorrem em regiões do Sol onde se encontram manchas solares, e durante este evento um dos fenômenos causados é o aumento da radiação solar. HSSWS é causada por ejeções de massa provenientes de buracos da corona, dando origem a correntes de vento solar de alta velocidade. Filamentos são estruturas da superfície do Sol, e quando desaparecem imagina-se que todo o seu material seja ejetado para o meio interplanetário, em um evento similar a uma explosão solar (MATSUOKA, 2007, p. 57-58).

Tempestades geomagnéticas e ionosféricas ocorrem especialmente em regiões aurorais, e sua frequência está relacionada com o ciclo solar. Durante o período de máxima atividade solar existe maior chance de ocorrerem tempestades geomagnéticas do que períodos de menor atividade (ODIJK, 1997, p. 74).

3.4.2 Cintilação Ionosférica

Irregularidades na ionosfera podem causar tanto o efeito de difração quanto de refração, e como consequência, flutuações da amplitude ou fase da onda são observadas, e são conhecidas como cintilação ionosférica. (WANNINGER, 1993; KOMJATHY, 1997, p. 26; RODRIGUES, 2003, p. 43). Odiijk (2002, p. 76) afirma que em cintilações de fase uma rápida mudança na fase acontece, e cintilações de amplitude degradam a força do sinal podendo até mesmo ocorrer perda de sinal.

Efeitos de cintilação são mais severos em anos de máxima atividade solar e em períodos de fortes tempestades geomagnéticas, principalmente em regiões equatoriais e aurorais. Em regiões de médias latitudes a ocorrência de cintilações ionosféricas é extremamente rara. Em regiões equatoriais, no entanto, cintilações podem ser muito fortes e frequentes, normalmente logo após o por do sol (ODIJK, 2002, p. 76).

3.5 ÍNDICE GEOMAGNÉTICO Kp

Distúrbios geomagnéticos podem ser monitorados por observatórios magnéticos capazes de registrar as componentes do campo magnético (GFZ, 2007). Vários índices empíricos tem sido definidos para descrever o comportamento do campo geomagnético, sendo que um dos mais importantes é o chamado Índice Kp (WILD, 1994, p. 24). Kp é o acrônimo do alemão *planetarische Kennziffer* – índice planetário. O valor global do índice Kp é obtido pela média dos distúrbios observados por 13 estações (GFZ, 2007), para períodos de tempo de 3 horas.

O índice Kp varia de 0 a 9 e é representado por uma escala quase logarítmica, expresso em terços de unidades (28 valores): 0o, 0+, 1-, 1o, 1+, 2-, 2o, 2+,..., 8-, 8o, 8+, 9-, 9o (GFZ, 2007). O valor 0 está associado a um período calmo, enquanto que o 9 a um período de forte distúrbio (KOMJATHY, 1997, p. 28). O quadro 3.1 mostra a classificação da atividade geomagnética em função do índice Kp. Outros índices existem, e maiores informações podem ser obtidos em: GFZ (2007), Komjathy (1997) e Matsuoka (2007).

Atividade Geomagnética	Índice Kp
Calma	0-2
Transição	3
Ativo	4
Tempestade fraca	5
Tempestade intensa	6
Tempestade muito intensa	7-9

QUADRO 3.1 – CLASSIFICAÇÃO ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA EM FUNÇÃO DO ÍNDICE Kp
 FONTE: Adaptado de Batista (2003) apud Matsuoka (2007, p. 61)

3.6 MODELOS IONOSFÉRICOS

Nesta seção serão brevemente descritos o modelo de Klobuchar, que permite corrigir o efeito da ionosfera em tempo real, e o modelo da camada ionosférica. Devido à grande quantidade de funções utilizadas na estimativa do VTEC baseados no modelo da camada ionosférica, serão apresentados somente dois deles, ambos implementados no programa Bernese: Série de Taylor e Harmônicos Esféricos.

3.6.1 Modelo Transmitido (*Broadcast*)

Klobuchar (1987) apresentou um modelo para correção do atraso ionosférico, em receptores de uma frequência, onde a variação diurna é descrita por uma função cosseno (figura 3.4). O modelo é basicamente descrito por quatro parâmetros: uma constante para o período noturno (DC) e a amplitude, fase e período do termo cosseno. No período noturno o termo DC é considerado constante e igual a 5 ns, enquanto que a amplitude máxima da fase ocorre às 14 horas local. A amplitude e o período são funções da latitude geomagnética do ponto sub-ionosférico, sendo representadas por polinômios de terceiro grau (KLOBUCHAR, 1987). Os coeficientes desses polinômios, em um total de oito, são transmitidos aos satélites, que os disponibilizam nas mensagens de navegação, permitindo correção

ionosférica em tempo real. No entanto, Leick (2004, p. 220) afirma que o algoritmo pode remover somente 50 a 60% do efeito total da ionosfera.

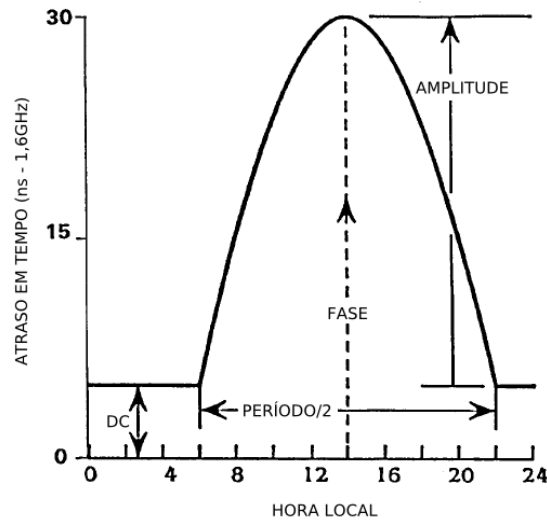


FIGURA 3.4 – MODELO DE KLOBUCHAR (TRANSMITIDO)
 FONTE: Adaptado de Wild (1994, p 41)

O formulário completo para o cálculo do atraso ionosférico pelo modelo transmitido pode ser encontrado em publicações como: Klobuchar (1987), Klobuchar (1996), Leick (2004, p. 119-221), Matsuoka (2003, p. 69-73), entre outros.

3.6.2 Modelo da Camada Ionosférica

No modelo da camada ionosférica, ou SLM (*Single Layer Model*), supõe-se que todos os elétrons livres estão concentrados em uma camada esférica de espessura infinitesimal a uma altitude H sobre a superfície da Terra. Este modelo reduz a complicada estrutura da ionosfera em uma única camada (WILD, 1994, p. 45). A altura da camada usualmente varia entre 350 e 400 km, valor que corresponde aproximadamente ao maior pico da densidade de elétrons na região F da ionosfera (SCHAER *et al.*, 1995). A figura 3.5 é uma representação deste modelo.

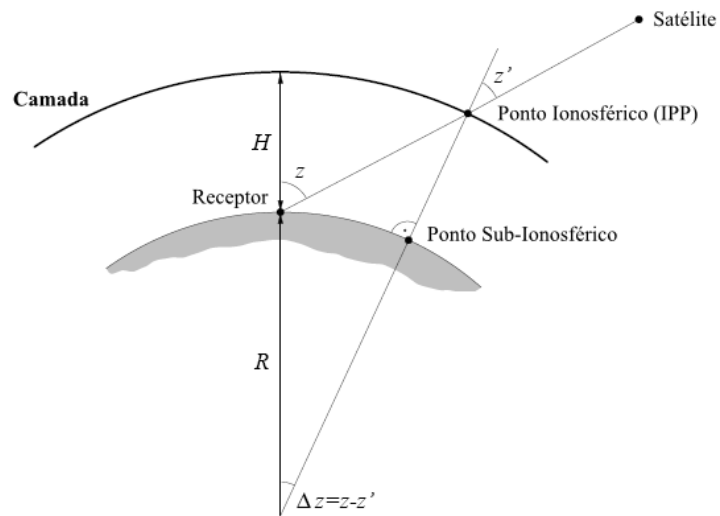


FIGURA 3.5 – MODELO DA CAMADA IONOSFÉRICA
 FONTE: Adaptado de Schaer (1999, p 55)

A relação entre o conteúdo total de elétrons na direção inclinada satélite-estação (TEC) e na direção do zênite (VTEC) é dada pela relação (SCHAER, 1999, p. 55):

$$TEC = F(z).VTEC \quad (3.1)$$

onde $F(z)$ é uma função de mapeamento que depende da distância zenital do satélite, segundo a equação (SCHAER, 1999, p. 57):

$$F(z) = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(z')}} \quad ; \quad \sin(z') = \frac{R}{R + H} \sin(z) \quad (3.2)$$

onde:

- $F(z)$: função de mapeamento;
- z : distância zenital do satélite;
- z' : distância zenital do satélite no ponto de interseção com a camada;
- R : raio médio da Terra (por exemplo: 6.371 km);
- H : altitude da camada;

IPP : ponto ionosférico (ingl. *ionospheric pierce point*): é o ponto de interseção da linha satélite-receptor com a camada ionosférica. Sua projeção sobre a superfície é chamada de ponto sub-ionosférico (ingl. *sub-ionospheric point*).

As coordenadas dos pontos ionosféricos são calculados em função da latitude e longitude da estação, do ângulo de elevação e azimute do satélite, do raio médio da Terra e da altura da camada ionosférica. A formulação é encontrada em várias publicações, como: El-Gizawy (2003), Klobuchar (1987) e Matsuoka (2007, p. 127).

3.6.3 Funções de Modelagem do VTEC

Nesta seção serão apresentadas duas funções utilizadas na modelagem do VTEC, ambas baseadas no modelo de camada ionosférica.

3.6.3.1 Série de Taylor

Wild (1994) desenvolveu um modelo ionosférico local onde foi utilizada a série de Taylor bidimensional para modelar o VTEC, segundo a equação (WILD, 1994, p. 46):

$$VTEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} E_{nm} \cdot (\beta - \beta_0)^n \cdot (s - s_0)^m \quad (3.3)$$

onde:

n_{\max}, m_{\max} : grau e ordem máximos da expansão bidimensional da série de Taylor em latitude e longitude;

E_{nm} : coeficientes da série;

- β, s : latitude geográfica e longitude (Sol fixo);
 β_0, s_0 : coordenadas da origem do desenvolvimento.

Wild (1994, p. 47) afirma que a escolha do grau da série depende do comportamento da ionosfera em relação ao tempo e espaço, e que graus muito altos diminuem a confiabilidade dos parâmetros estimados. O autor chegou à conclusão que valores 1-2 para a latitude e 2-4 para a longitude parecem ser adequados para intervalos de dados de 4 horas e para regiões menores que continentes.

3.6.3.2 Harmônicos Esféricos

Devido a limitações impostas pela representação da Série de Taylor, Schaer *et al.* (1995) propuseram um novo modelo baseado em harmônicos esféricos, permitindo assim a geração de modelos regionais e globais da ionosfera:

$$\text{VTEC}(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\text{sen}\beta) \cdot (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \text{sen} ms) \quad (3.4)$$

onde:

- β : latitude geocêntrica do ponto ionosférico;
 s : é a longitude (Sol fixo) do ponto ionosférico, e corresponde a
 $s = \lambda - \lambda_0$;
 λ, λ_0 : longitude geográfica do ponto ionosférico e longitude média do Sol;
 t : tempo;
 \tilde{P}_{nm} : polinômio de Legendre normalizado, de grau n e ordem m ;
 a_{nm}, b_{nm} : coeficientes dos harmônicos esféricos.

4 MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL EM REDES GPS

O modelo proposto neste trabalho para correção do efeito da refração ionosférica em redes GPS é baseado naquele proposto por Webster (1993). No modelo desenvolvido por aquele autor foram empregadas observações de fase da onda portadora, de dupla frequência, de três estações para estimar correções que foram aplicadas em estações de simples frequência localizadas nas proximidades da rede. Uma superfície linear foi utilizada para descrever o erro na rede para cada satélite em cada época. Wanninger (1995) trata aquele modelo como *Modelo Diferencial da Ionosfera* (figura 4.1).

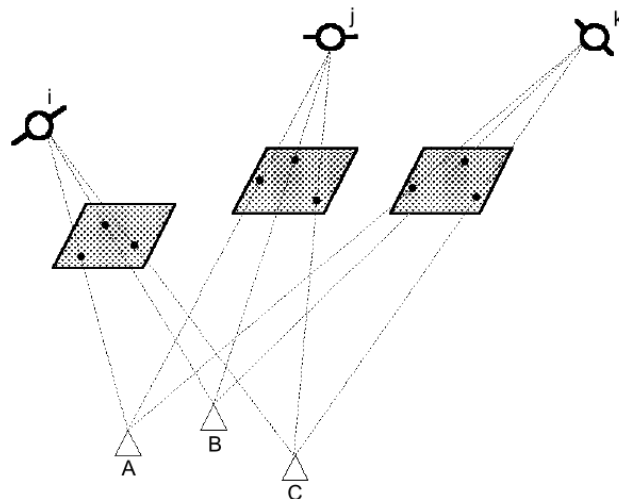


FIGURA 4.1 – MODELO DIFERENCIAL DA IONOSFERA
 FONTE: Adaptado de Wanninger (1995)

4.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

A idéia por trás da modelagem apresentada neste trabalho consiste em empregar um conjunto de três estações de referência, cujos receptores coletam observações do código nas duas frequências, para gerar correções ionosféricas locais, independentes para cada satélite em cada época de observação.

Optou-se em realizar o estudo empregando as observações do código, nas duas frequências, para a estimativa do conteúdo total de elétrons. A vantagem está

no fato deles não serem ambíguos e, portanto, o TEC pode ser estimado diretamente sem que exista a necessidade de resolução das ambiguidades. A desvantagem na utilização do código é que esta observável é menos precisa que a da fase. Uma forma para contornar esse problema é suavizar o código pela fase da onda portadora, reduzindo os ruídos inerentes desta observável.

Quando um determinado satélite é observado por um conjunto de estações de referência, o conteúdo total de elétrons (TEC) é calculado para cada par satélite-receptor, e em cada época. Neste caso, é importante que o DCB dos satélites e receptores sejam considerados. A conversão de TEC para VTEC é realizada por meio da função de mapeamento padrão do modelo de camada simples, localizado a uma altitude de 350 km.

Considerando que os valores de VTEC apresentam um comportamento aproximadamente linear na área coberta pela rede, um polinômio de primeiro grau, que descreve uma superfície linear, é empregado na modelagem. Os coeficientes do modelo são estimados independentemente para cada satélite em cada época de observação.

Conhecendo as coordenadas geodésicas aproximadas de uma estação localizada dentro da rede, e os coeficientes do modelo matemático, valores de VTEC são interpolados para esta estação, permitindo a correção de suas observações originais do efeito ionosférico. Observa-se que estações localizadas fora da rede também podem empregar estas correções, entretanto, deve-se considerar que erros próprios de extrapolações podem ocorrer.

4.2 CÁLCULO DO CONTEÚDO TOTAL DE ELÉTRONS

Partindo-se das equações referentes às observações do código nas duas frequências (equações 2.1 e 2.2), a combinação linear livre de geometria pode ser formada (equação 4.1), onde se observa que os termos referentes ao relógio dos satélites e do receptor, distância geométrica e refração troposférica são cancelados, segundo:

$$P_4 = P_1 - P_2 = (1 - \gamma)I_1 + B_r + B^j + (M_1 - M_2) + \varepsilon_{RP_2} \quad (4.1)$$

onde M_1 e M_2 representam o efeito multicaminho nas portadoras L_1 e L_2 , respectivamente, e os demais termos da equação já foram indicados anteriormente.

O atraso instrumental do receptor para o código P_1 foi combinado com o do código P_2 , resultando no termo $B_r = B_{1,r} - B_{2,r}$, que representa o atraso instrumental do receptor r entre as frequências L_1 e L_2 . De forma equivalente, o atraso instrumental para o satélite j entre as frequências L_1 e L_2 foi definido como $B^j = B_1^j - B_2^j$. O DCB (seção 2.4.3) pode ser obtido em arquivos IONEX, ou para os satélites a partir dos valores de T_{GD} (seção 2.4.3) disponíveis nos arquivos RINEX (ingl. *Receiver Independent Exchange format*) de navegação, onde uma constante relaciona as duas grandezas (equação 2.9).

O efeito multicaminho pode ser minimizado escolhendo cuidadosamente a local onde a antena GPS é instalada, bem como o uso de antenas capazes de reduzir este efeito. Considera-se que foram tomados os cuidados necessários para as estações de estudo, portanto o multicaminho é negligenciado. Além disso, o processo de suavização da pseudodistância minimiza o efeito do multicaminho ao longo do tempo. Com isso, a equação 4.1 pode ser escrita na seguinte forma:

$$P_1 - P_2 = (1 - \gamma)I_1 + B_r + B^j + \varepsilon_{RP_2} \quad (4.2)$$

Como visto no capítulo 3, existe uma relação entre o atraso ionosférico e o conteúdo total de elétrons, que depende da frequência, conforme a equação (2.35), repetida aqui por comodidade:

$$I_1 = \frac{40,3}{f_1^2} TEC \quad (4.3)$$

Devido à aproximação utilizada para o índice de refração (equação 2.25) somente efeitos de primeira ordem são estimados quando se emprega a equação 4.3. Seeber (1993, p. 310) afirma que o erro que permanece é da ordem de poucos centímetros. Como a observável empregada na estimativa do conteúdo total de

elétrons neste estudo é o código, verifica-se que os efeitos de ordem maior podem ser desprezados sem causar maior prejuízo ao posicionamento.

Isolando o termo referente à refração ionosférica na equação 4.2, introduzindo o resultado na 4.3, depois de algumas manipulações se chega à equação 4.4. Deve-se observar que o último termo da equação 4.2 é negligenciado.

$$TEC = \frac{f_1^2[(P_1 - P_2) - B_r - B^j]}{40,3(1 - \gamma)} \quad (4.4)$$

A equação 4.4 mostra que o TEC pode ser calculado diretamente a partir das observações do código, desde que o DCB dos satélites e do receptor sejam conhecidos. O TEC calculado pela equação 4.4 está em elétrons/m². Como esse número atinge valores muito altos, é conveniente empregar a unidade TECU (*TEC Unit* – unidade TEC), bastando para tanto dividir a quantidade TEC (em el/m²) por 1.10¹⁶ (el/m²) (LIU, 2004).

Aplicando a Lei de Propagação de Covariâncias na equação 4.4, e desconsiderando o DCB, chega-se à equação que representa a precisão com que o TEC é obtido:

$$\sigma_{TEC} = \frac{f_1^2}{40,3(1 - \gamma)} \sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_2}^2} \quad (4.5)$$

onde:

- σ_{TEC} : desvio-padrão para o TEC;
- σ_{P_1} : desvio-padrão para o código P₁;
- σ_{P_2} : desvio-padrão para o código P₂;

Considerando que a precisão do código P₁ e P₂ suavizados, é de 0,20 m, o desvio padrão para o TEC derivado destas observáveis é de 2,69 TECU. Admitindo-se que ao invés do código P₁ se emprega o código C/A suavizado, com uma precisão de 0,30 m, o TEC derivado tem precisão de 3,43 TECU.

A figura 4.2 mostra o VTEC estimado com e sem a suavização do código pela portadora. Com o código original (sem suavização) se observa uma nuvem de

pontos que varia consideravelmente entre épocas consecutivas. Já o VTEC estimado com as pseudodistâncias suavizadas apresenta maior precisão, podendo ser visto na figura como uma linha contínua.

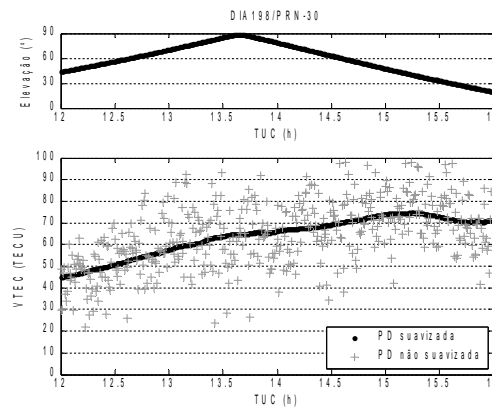


FIGURA 4.2 – VTEC ESTIMADO COM E SEM SUAUIZÇÃO DAS PSEUDODISTÂNCIAS
NOTA: Estação UFPR (REDE BR-D)

4.3 FUNÇÃO DE MAPEAMENTO

A função de mapeamento padrão do modelo da camada ionosférica foi utilizada na modelagem (equação 3.2).

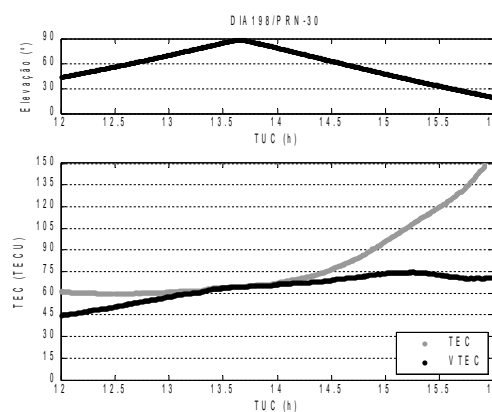


FIGURA 4.3 – TEC INCLINADO E VERTICAL
NOTA: Estação UFPR (REDE BR-D)

A figura 4.3 mostra o VTEC na direção do zênite e o TEC inclinado. Quando o ângulo de elevação do satélite é próximo de 90° , o VTEC e TEC praticamente coincidem, pois a função de mapeamento assume um valor próximo à unidade. À

medida que a distância zenital do satélite aumenta (a elevação diminui), o TEC assume valores maiores, numa relação inversa ao cosseno da distância zenital obtida no ponto de interseção com o modelo da camada ionosférica.

4.4 PONTO IONOSFÉRICO

Os valores de TEC obtidos empregando o modelo da camada ionosférica, são para um ponto específico: o ponto ionosférico (IPP). Como visto na seção 3.6.2, este é o ponto de interseção entre a linha que representa o sinal do satélite-receptor, com a camada ionosférica.

Matsuoka (2007, p. 126) mostra que para satélites com ângulo de elevação de 10° , o semi-diâmetro da camada ionosférica (para $H = 400$ km) é maior que 1.300 km. A figura 4.4 mostra a abrangência dos pontos ionosféricos calculados por uma única estação, onde foram observados todos os satélites disponíveis acima de 10° de elevação, durante 24 horas, pela estação UFPR em Curitiba.

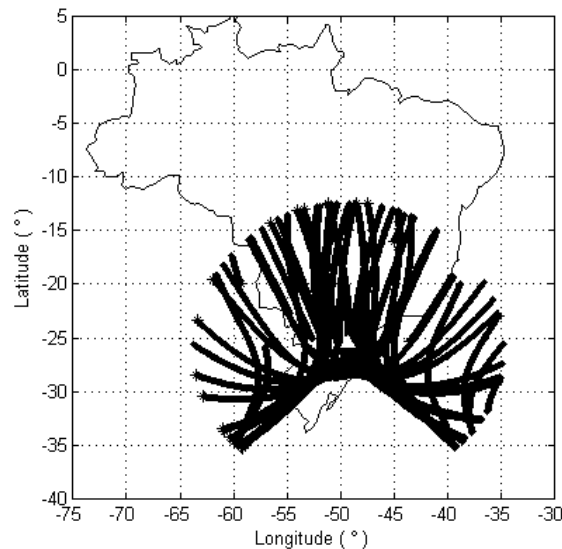


FIGURA 4.4 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS IONOSFÉRICOS
NOTA – Estação UFPR

4.5 MODELO MATEMÁTICO

Diversas técnicas podem ser empregadas para interpolar os erros estimados nas estações de referência para a região onde está localizada a estação teste. Para o caso de interpolação de erros em redes RTK, Dai *et al.* (2001) apresentam algumas técnicas e discutem as vantagens e desvantagens de cada uma. Soares (2005) investigou uma modelagem matemática para gerar correções diferenciais (ingl. *Differential Global Positioning System – DGPS*) a serem aplicadas em uma determinada área. Em seus experimentos, o autor empregou 15 estações de referência localizadas no estado de Baden-Württemberg, sul da Alemanha, distantes entre 22 e 225 km. Foram testados quatro modelos: um de primeiro grau, dois de segundo e um de terceiro, sendo que o de primeiro grau foi o que apresentou o melhor desempenho.

Como a modelagem proposta neste trabalho é realizada individualmente para cada satélite, considera-se que os valores de VTEC apresentam um comportamento aproximadamente linear na área coberta pela rede. Desta forma, um polinômio de primeiro grau do tipo $z = ax + by + c$ (equação do plano) é empregado como modelo matemático. A figura 4.5 é uma representação geométrica desta superfície.

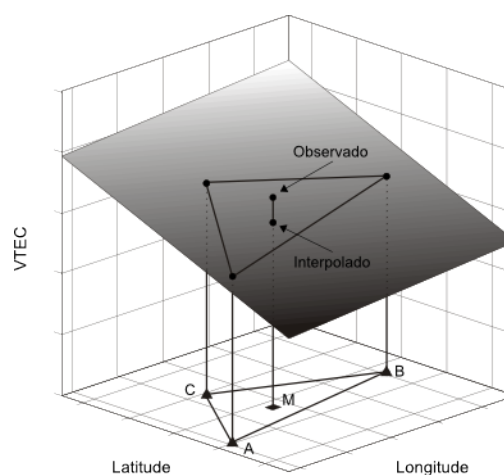


FIGURA 4.5 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO

O VTEC interpolado deveria ser o mais próximo possível daquele gerado pela própria estação, aqui denominado de VTEC observado. No exemplo da figura

(4.5) foi utilizado um polinômio de primeiro grau para modelar os erros na região compreendida entre as três estações de referência (A , B e C). Porém, devido à não linearidade dos erros, verifica-se que existe uma discrepância entre o VTEC interpolado e o observado pela estação teste M . Esta discrepância será quantificada e analisada na seção (6.3.2).

Um cuidado a ser tomado é em relação à distribuição geográfica das estações de referência. Estações distribuídas de forma colinear, ou quase colinear, podem trazer problemas na estimativa dos parâmetros, devido ao mal condicionamento da solução.

Realizando uma adaptação do polinômio de primeiro grau apresentado anteriormente, chega-se à seguinte equação:

$$(VTEC^j - VTEC_0^j) = a_\phi^j (\phi^j - \phi_0^j) + a_\lambda^j (\lambda^j - \lambda_0^j) \quad (4.6)$$

onde o termo à esquerda da igualdade representa as simples diferenças do VTEC entre uma estação qualquer ($VTEC^j$) e o da estação mestra ($VTEC_0^j$), para o satélite j , e os termos “ a ” são os denominados *coeficientes de rede* em latitude (ϕ) e longitude (λ). Estes coeficientes são estimados para cada satélite em cada época de observação, e eles representam geometricamente a declinação do plano. Observa-se que as coordenadas em latitude e longitude são do ponto ionosférico (onde ocorre a interpolação) que variam para cada satélite em cada época.

Particularizando para três estações de referência (A , B e C), sendo a primeira a estação mestra, um sistema de equações pode ser formado, escrito na forma matricial como:

$$L_b = AX ; \begin{bmatrix} VTEC_{AB}^j \\ VTEC_{AC}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \phi_{AB}^j & \Delta \lambda_{AB}^j \\ \Delta \phi_{AC}^j & \Delta \lambda_{AC}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_\phi^j \\ a_\lambda^j \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A solução do sistema se dá algebricamente por:

$$\hat{X} = A^{-1}L_b \quad (4.8)$$

onde:

- \hat{X} : vetor dos parâmetros estimados;
 A : matriz das derivadas parciais das funções em relação aos parâmetros (não singular);
 L_b : vetor das observações.

Considerando que existam mais que três estações de referência, os coeficientes podem ser estimados pelo método dos mínimos quadrados. Sendo P a matriz dos pesos, tem-se:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L_b) \quad (4.9)$$

Neste trabalho, o número de estações empregadas na estimativa dos parâmetros é três, ou seja, é o número mínimo de estações necessárias para a obtenção da solução. Este número foi escolhido em função da quantidade reduzida de estações GNSS disponíveis na região de estudo (no Brasil). Caso fossem utilizadas mais de três estações, como consequência se teria redes com dimensões consideráveis, e o prejuízo seria notado pelo menor número de satélites observados simultaneamente, bem como pela menor correlação entre os erros estimados pelas estações da rede.

Como não existe redundância de observações (graus de liberdade = 0), a solução se dá sem que se possa estimar a matriz variância-covariância dos parâmetros estimados. Além disso, testes de hipótese baseados na comparação das variâncias da unidade de peso *a priori* e *a posteriori*, que podem ser um indicativo da qualidade do ajustamento, também não puderam ser condizidos.

A forma utilizada para controlar erros, que podem causar problemas na modelagem, foi comparar os valores de VTEC calculados em cada estação entre si. O limite estipulado para que o VTEC de uma estação fosse diferente do VTEC das outras foi de 3 desvios-padrão do TEC (equação 4.5), valor este escolhido empiricamente.

O modelo utilizado para descrever o efeito devido à ionosfera na rede é linear, pois, assumiu-se que a variação do VTEC nessa área é aproximadamente linear. Mas é importante notar que essa hipótese pode não ser válida com o

aumento da atividade solar ou com a proximidade das estações com áreas de maior atividade ionosférica, como a região equatorial. Neste caso, outros modelos matemáticos podem ser empregados, como polinômios de grau maior, necessitando, no entanto, maior número de estações de referência.

4.6 INTERPOLAÇÃO E CORREÇÃO DAS OBSERVAÇÕES

O conhecimento das coordenadas aproximadas da estação teste permitem que as coordenadas do ponto ionosférico, para cada satélite, sejam calculadas. Empregando estas coordenadas e os coeficientes de rede, valores de VTEC são interpolados para a estação teste, segundo:

$$VTEC_{AM}^j = (VTEC_M^j - VTEC_A^j) = \begin{bmatrix} \Delta \phi_{AM}^j & \Delta \lambda_{AM}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_\phi^j \\ a_\lambda^j \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

O VTEC interpolado deve ser transformado em TEC, na direção satélite-receptor, empregando a função de mapeamento padrão da camada ionosférica. O conhecimento de valores de TEC permite que o atraso ionosférico seja obtido e utilizado na correção da pseudodistância original, conforme a seguinte equação:

$$P_{f,COR}^j = P_f^j - I_f^j \quad (4.11)$$

onde:

$P_{f,COR}^j$: pseudodistância corrigida [m], para o satélite j e frequência f ;

P_f^j : pseudodistância original [m]; e,

I_f^j : atraso ionosférico estimado em rede [m].

As observações do código C/A são corrigidas da mesma forma que as do código P. Para a correção das observações de fase, no entanto, deve-se levar em consideração os sinais opostos que a refração ionosférica afeta as observações de

código e fase, além da unidade de medida, que normalmente é dada em metros para o código ($I_{f,P}$) e ciclos para a fase ($I_{f,\phi}$). As seguintes equações podem ser empregadas para converter as grandezas (LEICK, 2004, p. 218):

$$I_{1,P} = -\frac{c}{f_1} I_{1,\phi} \quad ; \quad I_{2,P} = -\frac{c}{f_2} I_{2,\phi} \quad (4.12)$$

onde se verificam as relações:

$$\frac{I_{1,P}}{I_{2,P}} = \frac{f_2^2}{f_1^2} \quad ; \quad \frac{I_{1,\phi}}{I_{2,\phi}} = \frac{f_2}{f_1} \quad (4.13)$$

5 METODOLOGIA

5.1 ÁREA DE ESTUDO

Os experimentos foram conduzidos em duas regiões distintas: na Europa e no Brasil. O principal objetivo dessa escolha foi o de analisar os resultados obtidos em condições ionosféricas diversas, pois as estações europeias estão em latitudes médias e as brasileiras na região equatorial.

5.1.1 Europa

Foram escolhidas treze estações IGS (*International GNSS Service*) distribuídas na Europa Central (figura 5.1) para fazer parte dos testes. As coordenadas cartesianas precisas destas estações no ITRF2005, época 2000.0 (01/01/2000), podem ser visualizadas no quadro 5.1. As coordenadas foram estimadas com desvios-padrão entre 1 e 11 mm (ITRF, 2008).

Estação	Nr. DOMES	Local	X (m)	Y (m)	Z (m)
BOR1	12205M002	Borowiec (Polónia)	3738358,541	1148173,633	5021815,727
BRUS	13101M004	Brussels (Bélgica)	4027893,815	307045,743	4919475,067
GOPE	11502M002	Ondrejov (Rep. Checa)	3979316,204	1050312,391	4857067,044
GRAZ	11001M002	Graz (Áustria)	4194423,905	1162702,603	4647245,360
IENG	12724S001	Torino (Itália)	4476537,475	600431,335	4488761,272
OBE2	14208M003	Oberpfaffenhofen (Alem.)	4186558,423	835027,335	4723759,403
ONSA	10402M004	Onsala (Suécia)	3370658,613	711877,067	5349786,900
PADO	12750S001	Padova (Itália)	4388882,113	924567,373	4519588,677
PTBB	14234M001	Braunschweig (Alemanha)	3844060,034	709661,232	5023129,498
SPT0	10425M001	Boras (Suécia)	3328984,595	761910,195	5369033,628
WSRT	13506M005	Westerbork (Holanda)	3828735,941	443304,878	5064884,664
WTZZ	14201M014	Bad Koetzing (Alemanha)	4075579,506	931853,026	4801568,981
ZIMJ	14001M006	Zimmerwald (Suíça)	4331294,000	567542,045	4633135,662

QUADRO 5.1 – COORDENADAS DAS ESTAÇÕES IGS (ITRF2005 – ÉPOCA 2000.0)
FONTE: ITRF (2008)

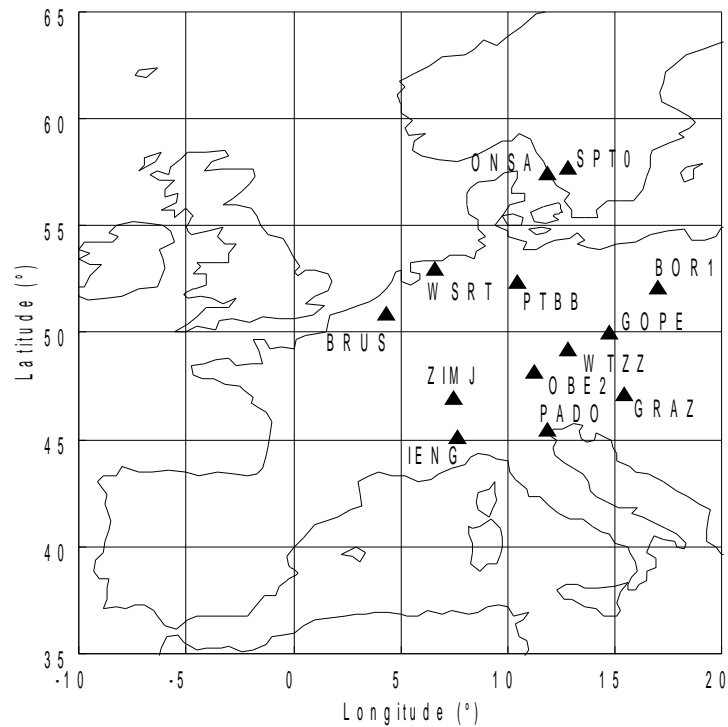


FIGURA 5.1 – ESTAÇÕES EUROPEIAS DO IGS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS

As estações foram inicialmente selecionadas de forma a apresentarem linhas de base com comprimento semelhante ao que se esperava obter com as estações brasileiras. Mas com a implantação de duas novas estações GNSS em Santa Catarina, observou-se que as distâncias entre as estações no Brasil ficaram menores do que as europeias, mas no entanto, optou-se em manter a configuração inicial. O quadro 5.2 mostra o comprimento das linhas de base entre todas as estações europeias, que variaram de 81 a 1.507 km (690 km em média).

	BOR1	BRUS	GOPE	GRAZ	IENG	OBE2	ONSA	PADO	PTBB	SPT0	WSRT	WTZZ	ZIMJ
BOR1	–	867,0	221,5	568,9	1033,9	598,7	677,8	795,2	433,6	709,4	696,5	414,5	849,5
BRUS	867,0	–	756,9	939,9	746,6	608,5	870,1	855,6	443,3	951,1	293,4	672,5	487,7
GOPE	221,5	756,9	–	380,7	815,9	381,6	814,1	577,3	383,8	861,3	659,7	194,5	647,0
GRAZ	568,9	939,9	380,7	–	642,3	345,2	1192,3	301,2	699,4	1240,7	947,6	293,9	609,3
IENG	1033,9	746,6	815,9	642,3	–	436,1	1435,8	354,1	853,2	1507,3	947,4	621,7	272,0
OBE2	598,7	608,5	381,6	345,2	436,1	–	1058,1	286,0	484,7	1122,6	674,5	188,4	289,0
ONSA	677,8	870,1	814,1	1192,3	1435,8	1058,1	–	1330,2	585,6	81,2	557,1	938,2	1177,3
PADO	795,2	855,6	577,3	301,2	354,1	286,0	1330,2	–	767,6	1390,0	956,6	402,3	412,3
PTBB	433,6	443,3	383,8	699,4	853,2	484,7	585,6	767,6	–	656,6	277,3	408,8	599,1
SPT0	709,4	951,1	861,3	1240,7	1507,3	1122,6	81,2	1390,0	656,6	–	658,2	995,4	1251,1
WSRT	696,5	293,4	659,7	947,6	947,4	674,5	557,1	956,6	277,3	658,2	–	654,6	676,0
WTZZ	414,5	672,5	194,5	293,9	621,7	188,4	938,2	402,3	408,8	995,4	654,6	–	465,6
ZIMJ	849,5	487,7	647,0	609,3	272,0	289,0	1177,3	412,3	599,1	1251,1	676,0	465,6	–

QUADRO 5.2 – COMPRIMENTO DAS LINHA DE BASE ENTRE AS ESTAÇÕES DO IGS (km)

Estas estações estão equipadas com receptores GPS/GNSS de dupla frequência, condição necessária para se estimar o efeito ionosférico diretamente das

observações. O quadro 5.3 mostra informações dos receptores e antenas instaladas em cada estação. Nota-se a variedade de fabricantes, daí a necessidade de se considerar os parâmetros de calibração das antenas. Com este procedimento, são esperados resultados do processamento de linhas de base com maior consistência. Ressalta-se também que no posicionamento por ponto preciso é necessário o emprego de parâmetros de calibração da antena, uma vez que os erros devido à variação do centro de fase devem ser minimizados.

Os receptores coletam observações do código P e fase da onda portadora nas duas frequências, com exceção dos receptores Trimble que coletam observações do código C/A ao invés do código P₁.

Estação	Tipo de Receptor	Tipo de Antena
BOR1	TRIMBLE NETRS	AOAD/M_T
BRUS	ASHTECH Z-XII3T	ASH701945B_M
GOPE	ASHTECH Z18	TPSCR3_GGD
GRAZ	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00
IENG	ASHTECH Z-XII3T	ASH701945C_M
OBE2	AOA BENCHMARK ACT	AOAD/M_T
ONSA	JPS E_GGD	AOAD/M_B
PADO	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00
PTBB	ASHTECH Z-XII3T	ASH700936E
SPT0	JPS LEGACY	AOAD/M_T
WSRT	AOA SNR-12 ACT	AOAD/M_T
WTZZ	TPS E_GGD	TPSCR3_GGD
ZIMJ	JPS LEGACY	JPSREGANT_SD_E

QUADRO 5.3 – INFORMAÇÕES INSTRUMENTAIS DAS ESTAÇÕES DO IGS
 FONTE: IGS (2009)

Foram selecionados 10 dias para a realização dos testes, iniciando no dia 258/2007 (15/09/2007) e finalizando no dia 267/2007 (24/09/2007). Estes dias foram selecionadas de modo a proporcionarem variações do índice geomagnético Kp, conforme figura 5.2. Nota-se que nos cinco primeiros dias os valores foram inferiores a 2, exceto para o dia 261. Isto significa que esses dias podem ser considerados dias com baixa atividade geomagnética. Os últimos cinco dias apresentam valores inferiores 4,5, e desta forma são considerados dias com atividade geomagnética moderada. De acordo com El Gizawy (2003, p. 26), dias com índices inferiores a 2 são considerados de baixa atividade ionosférica, entre 3 e 6 de atividade moderada e superiores a 7 de alta atividade.

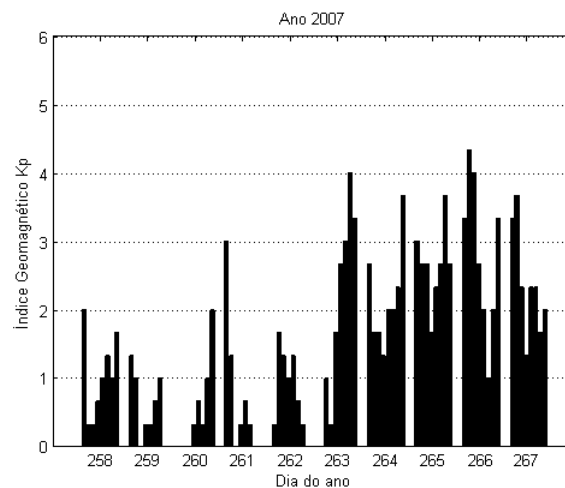


FIGURA 5.2 – ÍNDICE GEOMÁGNÉTICO Kp PARA OS DIAS 258-267/2007
 FONTE: GFZ (2009)

Os arquivos de observações contêm 24 horas de dados, com intervalo de gravação de 30 segundos e foram obtidos diretamente da área de *ftp* (ingl. *file transfer protocol*) do *Geographical Survey Institute* (GSI), do Japão (ftp://terras.gsi.go.jp/data/IGS_data/). Os arquivos são compactados no formato Hatanaka, e para descompactá-los basta utilizar o programa *CRX2RNX*, disponível neste mesmo sítio.

A modelagem ionosférica implementada opera com redes compostas por três estações de referência para desta forma gerar correções ionosféricas. Na Europa foram formadas duas redes, podendo ser visualizadas na figura 5.3. Para facilitar a visualização, algumas estações não utilizadas na modelagem ionosférica foram omitidas da figura.

A primeira rede conta com as estações BRUS, GOPE e ONSA e foi denominada rede EU-A (Europa A), (figura da esquerda). As linhas de base entre estas estações variam de 757 a 870 km e as estações teste foram PTBB, WSRT e SPT0. A estação PTBB se localiza mais próxima do centro da rede, onde a maior e a menor distância entre ela e as estações de referência é de 383 e 585 km. A estação WSRT, por sua vez, encontra-se aproximadamente em uma das bordas da rede e relativamente próxima à estação BRUS (293 km). Apesar da estação SPT0 se encontrar fora da rede, foi utilizada em um dos experimentos e está distante 80 km da estação ONSA.

A segunda rede, designada EU-B, é formada pelas estações BRUS, GOPE e IENG (figura da direita), e as linhas de base entre as estações variam de 757 a

816 km. Foram utilizadas duas estações para o estudo da modelagem ionosférica implementada. Ambas se localizam próximas a uma das estações de referência. A estação WTZZ está a 194 km da estação de referência GOPE e ZIMJ a 272 km da estação IENG.

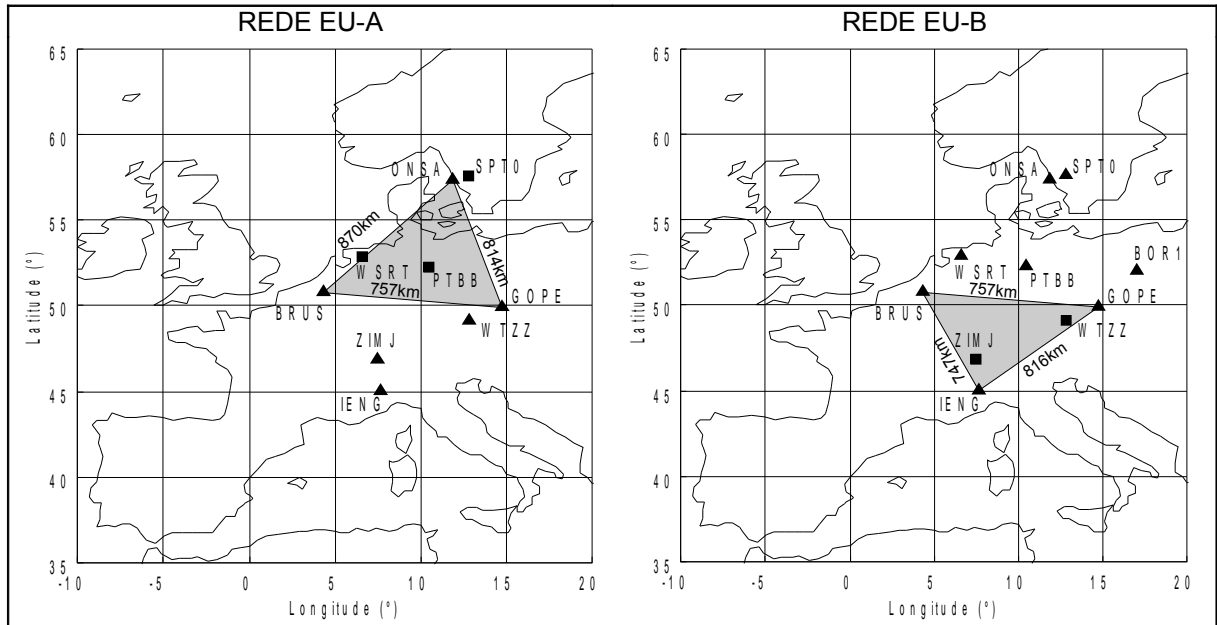


FIGURA 5.3 – REDES GPS FORMADAS NA EUROPA

5.1.2 Brasil

No Brasil foram escolhidas oito estações pertencentes à RBMC para os experimentos, sendo seis na Região Sul do país, e duas no Estado de São Paulo (figura 5.4). As coordenadas cartesianas precisas destas estações são conhecidas no SIRGAS2000, na época 2000.4 (quadro 5.4). As coordenadas foram estimadas com desvio-padrão entre 1 e 6 mm (IBGE, 2008).

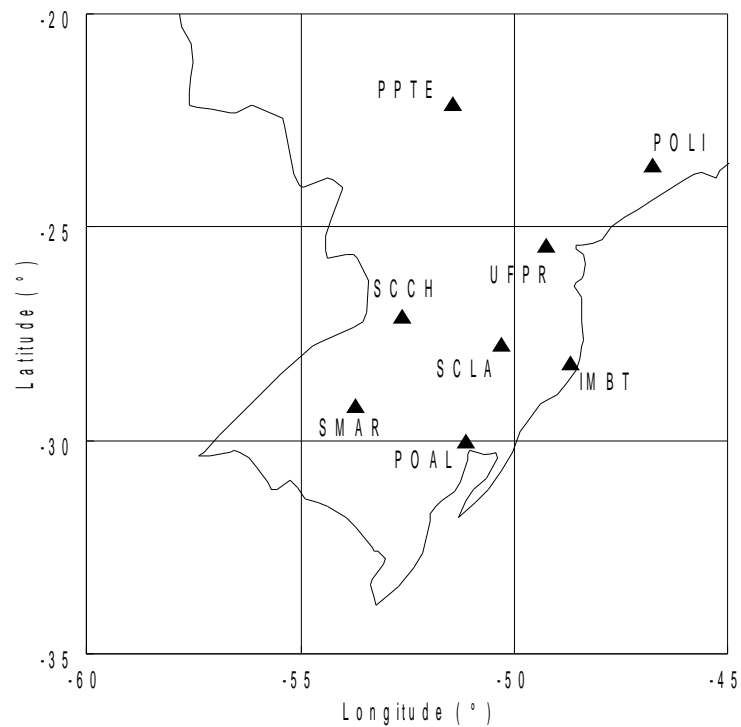


FIGURA 5.4 – ESTAÇÕES DA RBMC EMPREGADAS NOS EXPERIMENTOS

Estação	Código Int.	Local	X (m)	Y (m)	Z (m)
IMBT	94024	Imbituba (SC)	3714771,559	-4221851,099	-2999473,942
POAL	91850	Porto Alegre (RS)	3467519,406	-4300378,538	-3177517,731
POLI	93800	Esc. Politécnica USP (SP)	4010099,503	-4259927,302	-2533538,799
PPTe	93900	Presidente Prudente (SP)	3687624,367	-4620818,683	-2386880,382
SCCH	94026	Chapecó (SC)	3450305,441	-4512731,664	-2892128,265
SCLA	94025	Lages (SC)	3606986,062	-4345293,244	-2956654,210
SMAR	92013	Santa Maria (SC)	3280748,410	-4468909,741	-3143408,684
UFPR	93970	Curitiba (PR)	3763751,681	-4365113,832	-2724404,715

QUADRO 5.4 – COORDENADAS DAS ESTAÇÕES RBMC (SIRGAS2000 – ÉPOCA 2000.4)
 FONTE: IBGE (2008)

O quadro 5.5 mostra os comprimentos das linhas de base entre as estações da RBMC estudadas. Os comprimentos variam de 140 a 920 km (490 km em média).

	IMBT	POAL	POLI	PPTe	SCCH	SCLA	SMAR	UFPR
IMBT	–	280,9	529,0	733,8	406,0	138,7	509,5	293,9
POAL	280,9	–	791,9	878,9	365,3	211,0	300,2	516,4
POLI	529,0	791,9	–	496,6	687,1	587,4	920,6	298,1
PPTe	733,8	878,9	496,6	–	573,6	688,4	835,4	458,3
SCCH	406,0	365,3	687,1	573,6	–	274,0	266,1	396,7
SCLA	138,7	211,0	587,4	688,4	274,0	–	378,9	305,7
SMAR	509,5	300,2	920,6	835,4	266,1	378,9	–	623,1
UFPR	293,9	516,4	298,1	458,3	396,7	305,7	623,1	–

QUADRO 5.5 – COMPRIMENTO DAS LINHAS DE BASE ENTRE AS ESTAÇÕES DA RBMC (km)

Todas as estações são equipadas com receptores GPS/GNSS de dupla frequência. O quadro 5.6 mostra informações a respeito do receptor e antena instalados em cada estação. Nota-se que foram empregados somente receptores de dois fabricantes: *Trimble* e *Leica*, sendo que para os receptores *Trimble* dois modelos diferentes: *NetR5* e *NetRS*. Todos os receptores coletam observações de fase nas duas portadoras, código C/A e código P na portadora L₂.

Estação	Tipo de Receptor	Tipo de Antena
IMTB	Trimble NetR5	TRM55971.00
POAL	Trimble NetRS	TRM29659.00
POLI	Leica GRX1200 PRO	LEIAX1202
PPTE	Trimble NetRS	TRM41249.00
SCCH	Trimble NetR5	TRM55971.00
SCLA	Trimble NetR5	TRM55971.00
SMAR	Trimble NetRS	TRM41249.00
UFPR	Trimble NetR5	TRM55971.00

QUADRO 5.6 – INFORMAÇÕES INSTRUMENTAIS DAS ESTAÇÕES DA RBMC
 FONTE: IBGE (2008)

Foram selecionados 10 dias para a realização dos testes, iniciando no dia 193/2008 (11/07/2008) e finalizando no dia 202/2008 (20/07/2008). A figura 5.5 mostra os valores do índice Kp para os dias selecionados. Os primeiros dias apresentam atividade geomagnética moderada ($K_p < 4,5$) enquanto que os últimos dias baixa atividade.

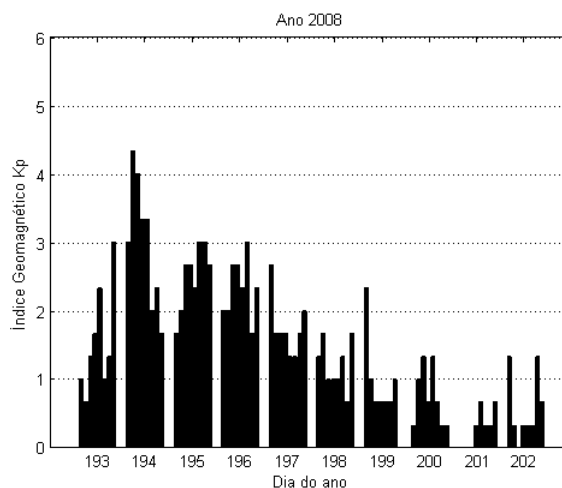


FIGURA 5.5 – ÍNDICE GEOMÁGNÉTICO Kp PARA OS DIAS 193-202/2008
 FONTE: GFZ (2009)

Os arquivos de observações contêm 24 horas de dados, com intervalo de gravação de 15 segundos e foram obtidos diretamente da área de *ftp* da RMBC (<ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/>).

Para a modelagem ionosférica implementada neste trabalho, também foram formadas redes utilizando três estações de referência cada uma (figura 5.6).

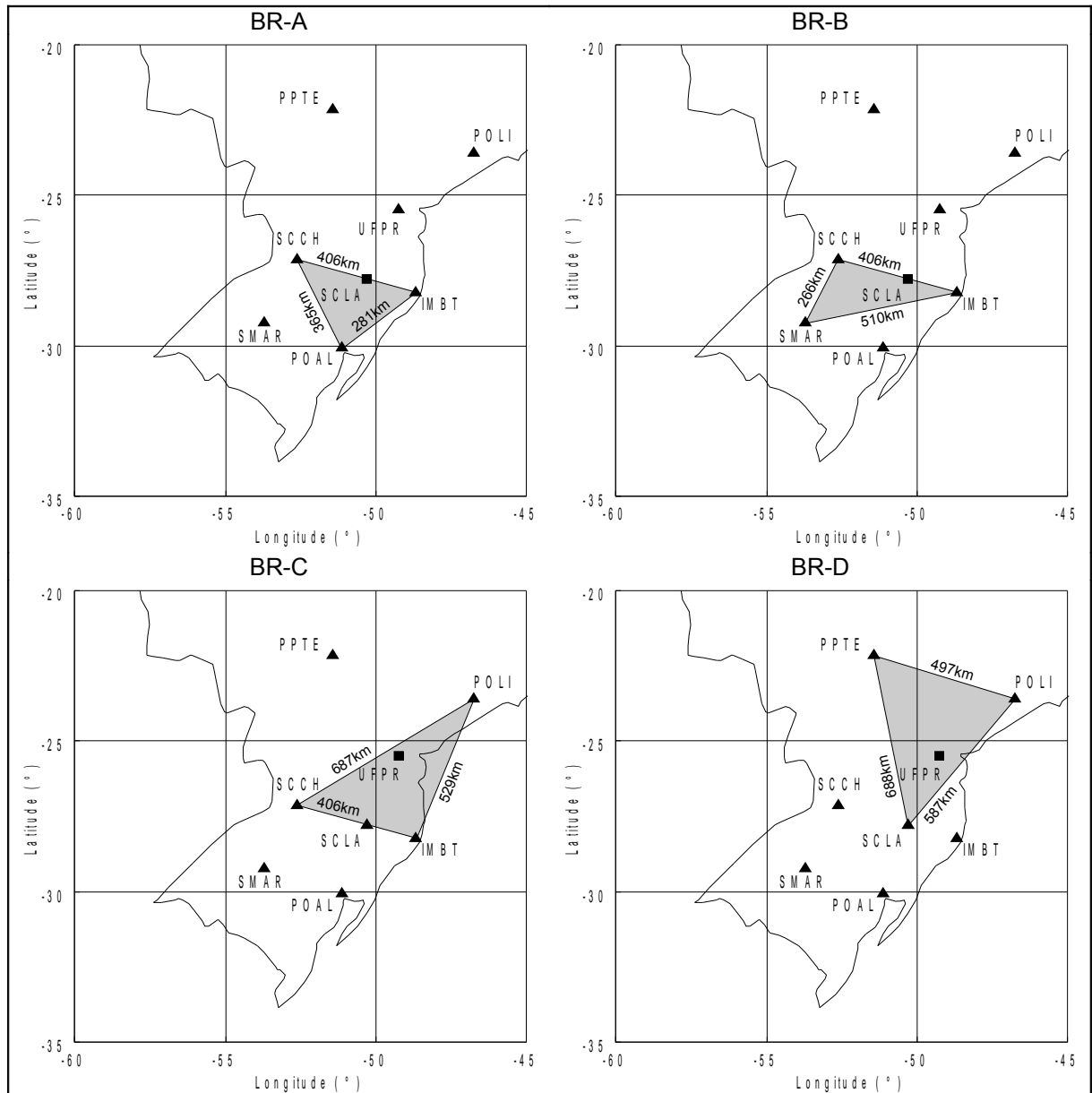


FIGURA 5.6 – REDES GPS FORMADAS NO BRASIL

A primeira delas é constituída pelas estações IMBT, SCCH e POAL e foi denominada BR-A (Brasil-A). As linhas de base entre as estações têm comprimentos entre 281 e 406 km. A estação teste foi SCLa, localizada aproximadamente em um

dos limites da rede, sendo que a estação mais próxima (IMBT) está a 139 km de distância e a mais distante (SCCH) a 274 km.

A segunda rede, BR-B, formada pelas estações IMBT, SCCH e SMAR difere da rede anterior por empregar a estação SMAR ao invés da POAL. As distâncias entre as estações de referência variam de 266 a 510 km, e a estação teste novamente foi SCLA.

A terceira rede, designada BR-C, é composta pelas estações IMBT, SCCH e POLI. As dimensões desta rede são maiores do que as anteriores, apresentando linhas de base de até 687 km. A estação teste é a UFPR e está a 294 km da estação mais próxima (IMBT) e 397 km da mais distante (SCCH).

A última rede, BR-D, apresenta dimensões comparáveis aos da BR-C e utiliza as seguintes estações de referência: SCLA, POLI e PPTE. A estação teste é a UFPR, distante 306 km da estação mais próxima SCLA.

5.2 PROGRAMAS UTILIZADOS

Nesta seção é apresentado o programa empregado no processamento das observações e o programa desenvolvido com o objetivo de modelar o efeito da ionosfera em rede.

5.2.1 Processamento PP e PPP com o Programa Bernese

O Programa Bernese (*Bernese GPS Software*) é um programa para processamento de observações GPS e GLONASS, desenvolvido pelo AIUB (Instituto Astronômico da Universidade de Bern, Suíça). Inicialmente ele foi desenvolvido com o objetivo de processar observações diferenciais (posicionamento relativo), no entanto, a partir da versão 4.2 passou a processar também observações não-diferenciais (HUGENTOBLE *et al.*, 2001). A atual versão é a 5.0.

O programa Bernese é utilizado por um grande número de instituições e universidades em vários países. Devido à grande quantidade de observações a

serem processadas em determinadas campanhas, foi desenvolvido um sistema para a automatização do processamento conhecido como BPE (ingl. *Bernese Processing Engine*). Inicialmente foi lançado na versão 4.0 com o propósito de otimizar o processamento de redes GPS. No entanto, verificou-se que este sistema foi utilizado não somente para o processamento de observações de redes permanentes mas também para diversas tarefas em que a automação de algumas etapas do processamento era desejável. O BPE pode ser usado em todas as tarefas, de forma sequencial ou paralela. *Scripts* para executar determinados programas, *download* de dados ou criação de relatórios podem ser escritos (DACH *et al.*, 2007). A lista de *scripts* que devem ser executados e a sequência com que isso acontece são definidos pelos chamados PCF (ingl. *Process Control Files*), arquivos do tipo ASCII (ingl. *American Standard Code for Information Interchange*).

A distribuição do Bernese contém alguns exemplos para serem utilizados pelo BPE, consistindo em uma série de *scripts* e quatro arquivos PCF, sendo um deles destinado ao posicionamento por ponto preciso, denominado PPP.PCF.

O arquivo PPP.PCF da distribuição original sofreu algumas modificações para se adaptar às necessidades deste trabalho. A estratégia de processamento utilizada nos experimentos pode ser visualizada da figura 5.7, a qual foi dividida basicamente em 3 etapas.

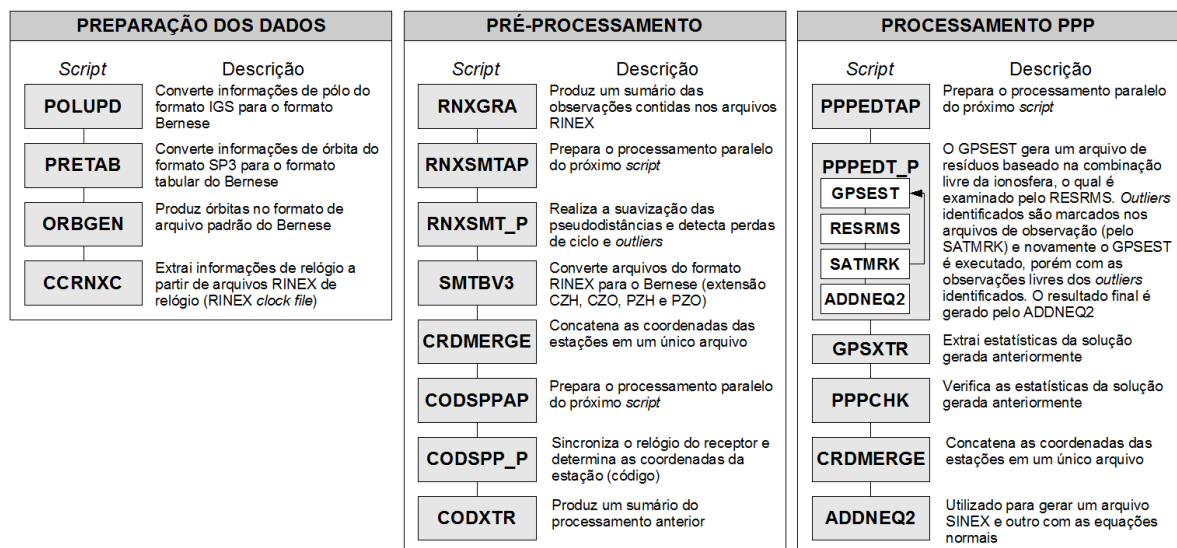


FIGURA 5.7 – ESTRATÉGIA DE PROCESSAMENTO PPP COM O PROGRAMA BERNESE
 FONTE: Adaptado de Teferle *et al.* (2005); Dach *et al.* (2007)

A primeira etapa, de preparação dos dados, tem o objetivo de preparar os

arquivos de informações do movimento do pólo, órbita e relógio dos satélites. A segunda etapa é a de pré-processamento, onde ocorre a detecção de perdas (ou saltos) de ciclo, suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora, conversão dos arquivos do formato RINEX para o formato Bernese e o posicionamento por ponto utilizando as pseudodistâncias suavizadas. O principal objetivo desta etapa é gerar coordenadas aproximadas, com observações do código, e determinar o erro do relógio do receptor. A terceira e última etapa é o processamento PPP propriamente dito. O processo consiste em: gerar resíduos baseados na combinação livre da ionosfera (GPSEST) os quais serão examinados pelo programa RESRMS; identificar *outliers*, os quais são marcados nos arquivos de observação (SATMRK); utilizar o GPSEST novamente, mas desta vez com as observações livres de *outliers* identificados anteriormente. Este processo se dá de forma iterativa com diferentes limites para a detecção de *outliers*. Finalmente, as coordenadas da estação e de outros parâmetros são estimados.

Quanto às opções de processamento, citam-se as principais utilizadas neste trabalho: ângulo de elevação de 15 graus, Saastamoinen como modelo *a priori* para a troposfera associado à função de mapeamento Niell (componente hidrostática), peso dependente da elevação dos satélites, parâmetros de calibração absolutos para a variação do centro de fase das antenas, e o intervalo de observações para processamento foi de 300 s para o processamento de 24 horas de observações ou 30 s para intervalos menores.

Além dos arquivos RINEX de observação, os processamentos exigem arquivos de órbitas precisas, parâmetros de orientação da Terra e RINEX com informações de relógio do satélite. Para as estações europeias foram escolhidos os produtos do CODE, obtidos da área de *ftp* disponível em: [<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>](ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/). E para o processamento das estações brasileiras foram escolhidos os produtos IGS, disponíveis para *ftp* em: [<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/product/>](ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/product/).

O quadro 5.7 mostra o formato dos produtos utilizados no processamento com o programa Bernese. A sigla *www* refere-se à semana GPS, *d* ao dia (0 para domingo, 1 para segunda-feira, e assim sucessivamente até 6 para sábado), *yy* ao ano e *mm* ao mês. A última coluna do quadro 5.7 representa a extensão dos arquivos estabelecidas neste trabalho para o Bernese. Infelizmente nenhum

programa do Bernese é capaz de ler arquivos contendo informações de mapas de ionosfera no formato IONEX, somente no formato Bernese (ION).

Descrição (produto final)	CODE	IGS	BERNESE
Órbita – 15min	CODwwwwd.EPH	igswwwwd.sp3	.PRE
Relógio – 30s	CODwwwwd.CLK	igswwwwd.clk_30s	.CLK
Parâmetros de Rotação da Terra	CODwwww7.ERP	igswwwwd.erp	.IEP
P1-P2 DCB	P1P2yymm.DCB	–	.DCB
P1-C1 DCB	P1C1yymm.DCB	–	.DCB
Mapa Global Ionosfera – formato IONEX	CODGddd0.yyl	–	–
Mapa Global Ionosfera – formato BS	CODwwww0.ION	–	.ION

QUADRO 5.7 – PRODUTOS CODE/IGS UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS

FONTE: Dach *et al.* (2007); IGS(2009)

5.2.2 Modelagem Ionosférica com o Programa Bernese

O programa Bernese pode modelar a ionosfera de três formas, são elas:

- a) modelo bidimensional baseado no desenvolvimento da série de Taylor;
- b) modelo global/regional baseado em desenvolvimento em harmônicos esféricos; e,
- c) modelo específico para a estação (*site specific*) baseado também em harmônicos esféricos.

Devido à abrangência das estações utilizadas no estudo, foi escolhido o modelo regional, onde um grupo de parâmetros ionosféricos foi estimado por uma rede composta por várias estações. As observáveis utilizadas foram as fases das ondas portadoras. O programa que realiza esta tarefa é o GPSEST.

O grau e ordem máximos para a expansão por harmônicos esféricos foi igual a 5, totalizando 36 parâmetros a serem estimados no processo. A altura da camada ionosférica foi de 450 km, e o raio médio de 6.371 km. A modelagem foi realizada no sistema geomagnético, onde a latitude e longitude do dipolo foi de 79° e -71°, respectivamente. O ângulo de elevação mínimo dos satélites foi de 15° e o intervalo de processamento foi de 15 segundos. Além dos parâmetros ionosféricos, o programa GPSEST está apto para estimar os DCB.

Foi criado um arquivo do tipo PCF para estimar os parâmetros ionosféricos e o DCB utilizando uma rede de estações. A figura 5.8 mostra uma sequência de *scripts* empregados na modelagem ionosférica com o programa Bernese.

O *script* PPP_EST_P (figura 5.8) utiliza o programa GPSEST para estimar os parâmetros ionosféricos específicos de estação (modelo c) os quais são armazenados em formato próprio (ION). Os DCB dos receptores também são estimados e armazenados em arquivos com extensão DCB. No *script* GPSEST o programa de nome homônimo é empregado novamente mas desta vez para estimar os parâmetros ionosféricos para o modelo regional (modelo b) e os DCB. Mapas regionais da ionosfera são gerados nesta etapa no formato IONEX (INX).

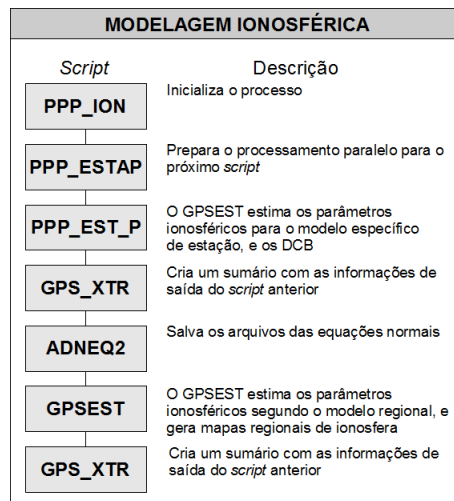


FIGURA 5.8 – MODELAGEM IONOSFÉRICA COM O PROGRAMA BERNESE

5.2.3 Programa de Modelagem Ionosférica Local em Rede

Um programa computacional foi desenvolvido, pelo autor deste estudo, com o objetivo de modelar o efeito da ionosfera localmente e corrigir as observações de estações de uma frequência localizadas na rede. Ele foi desenvolvido em linguagem de programação C++, e o módulo principal do programa foi denominado *Local TEC Model* (LTM),

Este programa é utilizado em uma etapa intermediária do processamento dos dados com o Bernese. Inicialmente o Bernese, instalado sobre uma plataforma

LINUX, é executado até a etapa de detecção de perdas de ciclos e suavização das pseudodistâncias (RNXSMT_P) (figura 5.9, etapa 1).

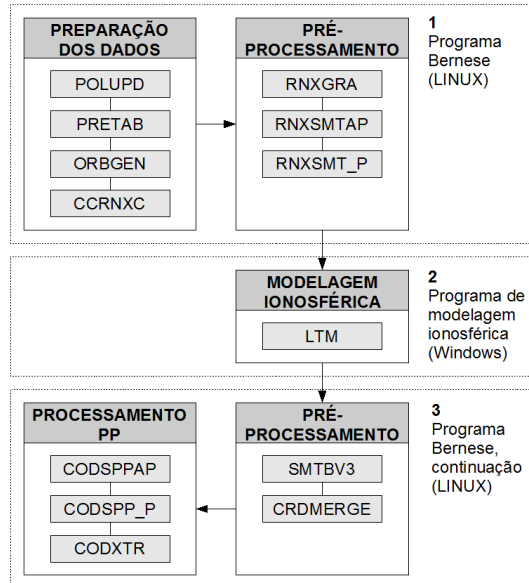


FIGURA 5.9 – ETAPAS DO PROCESSAMENTO

Os arquivos RINEX resultantes são utilizados como arquivos de entrada para o programa de modelagem ionosférica local (figura 5.9, etapa 2). Como o programa foi desenvolvido para uma plataforma Windows, a transferência dos arquivos entre as plataformas LINUX e Windows, e vice-versa, foi realizada manualmente via *ftp*.

Após a determinação dos coeficientes de rede e correção das observações originais das estações teste, arquivos RINEX corrigidos deste erro são gerados e transferidos para o computador onde o Bernese está instalado, dando continuidade ao processamento (figura 5.9, etapa 3). O passo seguinte consiste na transformação dos arquivos do formato RINEX para o formato Bernese (RNXBV3) e o processamento PP propriamente dito é realizado, por meio do programa CODSPP.

As etapas de processamento envolvidas no programa desenvolvido obedecem ao fluxograma apresentado na figura 5.10, sendo explicado com maiores detalhes na sequência.

Os dados de entrada do programa são arquivos RINEX de observação de cada estação (REF), efemérides precisas no formato SP3 e arquivos contendo informações do DCB dos satélites e receptores. Os arquivos RINEX, além das observações (OBS) contêm as coordenadas precisas de cada estação (XYZ). Estes

arquivos são editados de forma a conterem estas informações, pois são necessárias para a estimativa dos coeficientes de rede. Os arquivos das efemérides precisas (SP3) são utilizados para a obtenção da posição do satélite, e posterior cálculo do ângulo de elevação e azimute em relação às estações. Os arquivos IONEX utilizados neste programa devem conter o DCB das estações e dos satélites, informações necessárias para o cálculo dos TEC. Informações de VTEC contidos no IONEX não são utilizadas na modelagem ionosférica desenvolvida.

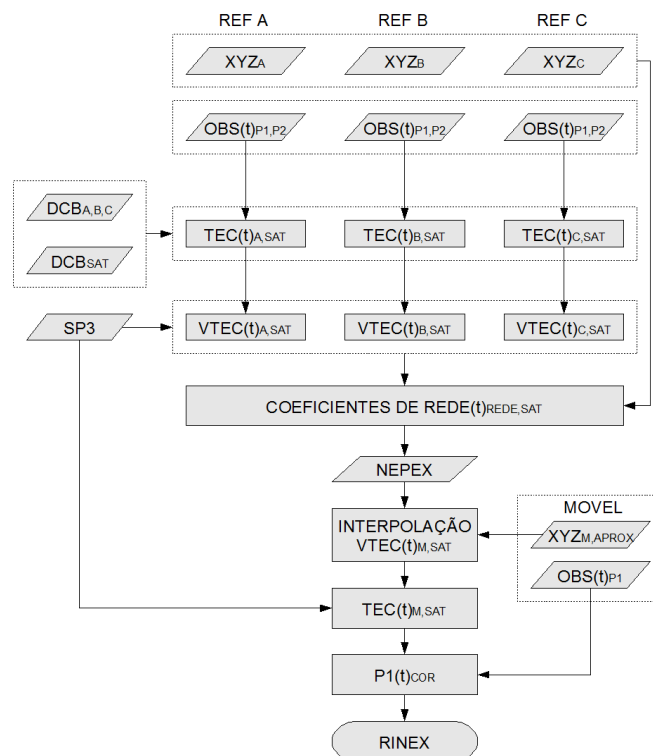


FIGURA 5.10 – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

As observáveis utilizadas no processamento são as pseudodistâncias do código suavizado pelo fase da onda portadora, nas duas frequências, permitindo que valores inclinados de TEC sejam obtidos de forma absoluta para cada par satélite-estação, em cada época de observação (t). Devido aos diferentes ângulos de elevação dos satélites, emprega-se valores de VTEC ao invés de TEC, que são convertidos por meio da função de mapeamento padrão do modelo da camada ionosférica.

Calculados os VTEC para cada par satélite-estação, em cada época, o próximo passo consiste em estimar os coeficientes de rede (CR). A validade deste coeficientes é para a época para a qual foram calculados e para os satélites que

foram observados simultaneamente em todas as estações. Os demais satélites são descartados numa etapa de pré-processamento. Ao final deste processo um arquivo contendo os coeficientes de rede e as coordenadas do ponto ionosférico para o par satélite-estação mestra, para cada época é gerado. Este arquivo foi denominado NEPEX, sendo descrito com maiores detalhes na seção 5.2.4.

Com os arquivos NEPEX e RINEX da estação teste é possível realizar a interpolação dos VTEC para a posição aproximada da estação teste. Os valores de VTEC interpolados na etapa anterior são transformados em valores inclinados (TEC) na direção estação-satélite e as pseudodistâncias originais da estação teste são então corrigidas dos erros estimados em rede. Finalmente, um arquivo RINEX contendo as pseudodistâncias corrigidas é gerado.

O programa também é capaz de corrigir as observações utilizando mapas de ionosfera no formato IONEX. Neste caso, são necessários os arquivos RINEX da estação teste, efemérides precisas e arquivos IONEX. Para um ponto qualquer, localizado dentro dos limites geográficos indicados no cabeçalho do arquivo IONEX, valores de VTEC são interpolados a partir de valores de 4 outros pontos da grade. Devido à regularidade das grades e da simplicidade do método, optou-se em aplicar um interpolador bilinear. A interpolação entre épocas consecutivas, não implementada no programa, é uma técnica que pode ser empregada visando melhores resultados.

5.2.4 Formato NEPEX

O formato RINEX (GUERTNER, 2007) foi utilizado como modelo para o desenvolvimento do formato NEPEX (ingl. *NEtwork Parameters EXchange Format*), pelo autor deste estudo. Ele foi criado para facilitar a leitura, gravação e interpretação das informações ionosféricas geradas em rede. A figura 5.11 é um exemplo de um arquivo NEPEX criado para o dia 193/2008 (11/07/2008) utilizando as estações de referência IMBT, SCCH e POAL.

Tal qual o formato RINEX, o NEPEX é dividido em duas seções: cabeçalho e dados. O cabeçalho contém informações gerais e aquelas necessárias à interpolação. As primeiras são aquelas para o conhecimento do usuário, como:

intervalo dos dados, ângulo de elevação mínimo dos satélites, o tipo de observável utilizada, estações que formaram a rede, entre outros. Já as informações necessárias contêm parâmetros que devem ser os mesmos a serem utilizados pela estação teste para que se possa alcançar um resultado coerente, tais como: função de mapeamento, sistema de referência, raio médio da Terra e número de parâmetros. A estação teste deve utilizar necessariamente a mesma função de mapeamento, sistema de referência, raio da Terra e o mesmo modelo matemático para a interpolação.

1.00	NETWORK PARAMETERS	GPS	RINEX VERSION / TYPE
LTM	MSCT	20/2/2009	PGM / RUN BY / DATE
NETwork Parameters EXchange format			DESCRIPTION
30			INTERVAL
COSZ			MAPPING FUNCTION
15.0			ELEVATION CUTOFF
Code pseudorange smoothed by carrier phase			OBSERVABLES USED
3			# OF STATIONS
IMBT SCCH POAL			COMMENT
GEO			REFERENCE FRAME
6371.0			BASE RADIUS
2			# OF PARAMETERS
			END OF HEADER
08 7 11 12 0 0.0000000 0 6			
G02 4.463 -29.798 -46.404 0.068 0.047			
G04 5.154 -33.353 -42.987 -0.373 0.457			
G05 1.414 -29.639 -49.043 0.343 0.278			
G09 4.605 -25.604 -49.446 0.493 0.325			
G24 3.871 -24.888 -50.059 0.254 -0.007			
G30 7.791 -30.839 -50.852 0.101 0.147			
08 7 11 12 0 29.9999980 0 6			
G02 4.460 -29.815 -46.395 0.069 0.045			
G04 5.170 -33.395 -42.947 -0.380 0.464			
G05 1.407 -29.629 -49.033 0.342 0.276			
G09 4.619 -25.581 -49.446 0.486 0.322			
G24 3.860 -24.915 -50.053 0.258 -0.010			
G30 7.827 -30.827 -50.832 0.107 0.153			
08 7 11 12 0 59.9999960 0 6			
G02 4.464 -29.832 -46.386 0.075 0.047			
G04 5.142 -33.438 -42.907 -0.378 0.460			
G05 1.409 -29.618 -49.022 0.348 0.280			
G09 4.618 -25.557 -49.447 0.484 0.316			
G24 3.843 -24.942 -50.047 0.249 -0.012			
G30 7.830 -30.814 -50.812 0.115 0.149			
...			

FIGURA 5.11 – EXEMPLO DE ARQUIVO NO FORMATO NEPEX

A seção de dados contém informações referentes à época, número de satélites e parâmetros para a interpolação. Em cada época, tem-se para cada satélite cinco informações: VTEC para o par satélite-estação mestra, as coordenadas latitude e longitude do ponto ionosférico para o par satélite-estação mestra, e os coeficientes de rede nas direções da latitude e longitude. Para o caso de serem utilizadas mais estações de referência na modelagem, o número de

coeficientes pode aumentar em função do modelo matemático empregado na modelagem.

5.3 ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE

O método de posicionamento utilizado neste trabalho é o absoluto. Dentro deste método os experimentos foram realizados utilizando o posicionamento por ponto preciso (PPP) e o posicionamento por ponto (PP), de acordo com a figura 5.12.

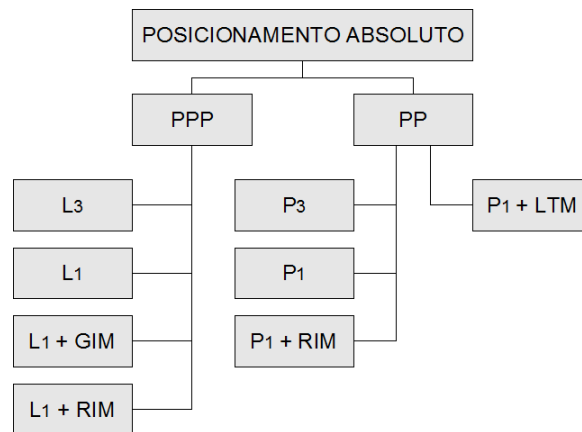


FIGURA 5.12 – ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE

O melhor do posicionamento absoluto é obtido pelo posicionamento por ponto preciso quando se emprega a observável resultante da combinação livre da ionosfera (PPP – L_3), de acordo com a figura 5.12. No Capítulo 6 serão mostrados os resultados obtidos nos processamentos. Para avaliar o quanto a ionosfera interfere no posicionamento, realizou-se também o processamento PPP sem levar em consideração este erro, ou seja, o processamento foi realizado utilizando observações de fase e código da portadora L_1 somente (PPP – L_1). Ainda foram analisados os resultados do processamento L_1 com correções ionosféricas advindas de mapas globais (PPP – $L_1 + GIM$) e regionais da ionosfera (PPP – $L_1 + RIM$).

Posteriormente, realizou-se o posicionamento por ponto, que consiste na utilização de observações de código somente, indicado como PP na figura 5.12. Neste caso, foi gerada uma única solução envolvendo observações de todas as

épocas. Os melhores resultados são esperados no processamento utilizando a combinação livre da ionosfera (PP – P₃), sendo neste caso obrigatória a existência de observações de código nas duas portadoras (P₁ e P₂ ou C/A e P₂). Da mesma forma que no processamento PPP, realizou-se o processamento sem correção ionosférica alguma (PP – P₁) e outro empregando mapas regionais de ionosfera (PP – P₁ + RIM). Finalmente, realizou-se o processamento PP utilizando o código P₁ com as correções ionosféricas geradas em rede e implementadas no programa desenvolvido (PP – P₁ + LTM). As estações brasileiras não fornecem o código P₁, somente o código C/A.

Com exceção do processamento que utiliza a combinação livre a ionosfera, todos os demais utilizam observações de uma única frequência, seja ela a fase da onda portadora (L₁) ou seja o código P₁ ou C/A. Porém, é importante salientar que na etapa de detecção de perdas de ciclo e suavização da pseudodistância (quando realizada) o programa Bernese utilizada observações das duas frequências. Assim, os resultados obtidos neste estudo devem apresentar melhor desempenho se comparado ao processamento que emprega efetivamente observações de uma única frequência durante todo o processo.

No processamento por ponto com o modelo local (PP – P₁ + LTM), as observações das estações teste não foram suavizadas com o objetivo de minimizar a influência da da frequência L₂ na solução. Entretanto, as observações das estações de referência foram suavizadas de modo a se estimar valores de TEC mais precisos.

Realizou-se também a análise de diversos fatores que influenciam diretamente na qualidade da modelagem implementada, sendo eles: número de satélites observados simultaneamente em todas as estações de referência da rede e as estações teste, comparação do TEC observado com o interpolado e análise dos parâmetros de rede.

Discrepâncias entre os valores de VTEC interpolados (utilizando informações da rede) com aqueles observados (utilizando observações de dupla frequência da própria estação teste) são calculados para cada satélite, em cada época, de acordo com:

$$\Delta VTEC_i^j = VTEC_{INT,i}^j - VTEC_{OBS,i}^j \quad (5.1)$$

onde:

$\Delta VTEC_i^j$: discrepância entre o VTEC interpolado e o observado;

i : época de observação;

j : satélite observado;

$VTEC_{INT}$: VTEC interpolado;

$VTEC_{OBS}$: VTEC observado pela estação teste, calculado com observações de dupla frequência.

O desvio-padrão (σ^j) para as discrepâncias é obtido em função do número de épocas de observação (n), segundo a equação (5.2):

$$\sigma^j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta VTEC_i^j)^2} \quad (5.2)$$

onde os demais elementos da fórmula foram definidos anteriormente.

O erro relativo é o módulo do quociente resultante da discrepância do VTEC calculada para um satélite, em determinada época, pelo VTEC observado para o mesmo satélite. Multiplicando-se o valor resultante por 100, tem-se o erro relativo em porcentagem, de acordo com a equação 5.3:

$$ER_i^j (\%) = \left| \frac{\Delta VTEC_i^j}{VTEC_{OBS,i}^j} \right| \cdot 100 \quad (5.3)$$

Nas análises calculou-se um valor médio do erro relativo obtido em todas as épocas. Esse erro quantifica quanto o valor interpolado foi diferente do valor observado, em média. Assim, quanto menor o erro melhor é o desempenho do modelo implementado.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos segundo as estratégias de processamento e esquemas de análise descritos no capítulo 5.

Das treze estações europeias estudadas (figura 5.1), serão apresentados os resultados de apenas quatro delas neste capítulo: PTBB, WSRT, SPT0 e WTZZ. Estas estações foram escolhidas em função de terem sido utilizadas como estações teste no processamento que envolveu a modelagem ionosférica local (seção 6.4). É importante lembrar que a estação SPT0 se encontra fora da rede, mas devido à sua proximidade com a estação ONSA foi empregada como estação teste. Devido à problemas na geração dos arquivos NEPEX da estação ZIMJ, os resultados do processamento PPP e PP para esta estação não serão apresentados neste capítulo, porém, encontram-se no Apêndice A juntamente com os resultados das demais estações. Devido à falta de observações na estação OBE2, para vários períodos e dias, decidiu-se não apresentar os resultados neste estudo.

Para as estações da RBMC (figura 5.4) serão mostrados os resultados de todas as oito estações.

6.1 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

O principal programa do Bernese para o processamento PPP é o GPSEST. Nele o usuário tem a possibilidade de escolher a observável de processamento (L_1 ou L_3 , por exemplo), bem como uma série de outras opções, dentre elas a possibilidade de utilizar ou não mapas globais/regionais de ionosfera.

6.1.1 PPP com a observável livre da ionosfera (L_3)

No processo de ajustamento de observações o programa estimou, dentre outros parâmetros, as coordenadas das estações no sistema geodésico cartesiano

tridimensional e os desvios-padrão destas coordenadas. Para o caso das estações europeias, as coordenadas encontravam-se no mesmo sistema de referência das efemérides precisas, ou seja, ITRF2005 (*International Terrestrial Reference Frame 2005*). Como visto na seção 2.4.1, as coordenadas dos satélites tem suas coordenadas referenciadas à época de observação enquanto que as precisas na época de origem do sistema. A conversão das coordenadas que se encontravam em um mesmo sistema de referência para épocas diferentes foi realizada por meio de uma transformação onde o conhecimento da velocidade das estações era necessário.

Com as coordenadas conhecidas e as processadas em um mesmo sistema de referência e em uma mesma época, partiu-se para o cálculo da diferença entre elas, em um sistema geodésico local, adotando como origem as coordenadas precisas de cada ponto no elipsóide, no sistema de referência em que eles se encontram. As diferenças para as componentes nas direções norte, leste e altura foram denominadas dn , de e du (*north*, *east* e *up*).

A parte superior de cada gráfico da figura 6.1 são mostradas as discrepâncias para as três componentes calculadas a partir dos resultados obtidos do processamento PPP das quatro estações europeias. Na parte inferior da figura, encontram-se os desvios-padrão calculados em função dos desvios-padrão das três coordenadas estimados pelo programa Bernese no processo de ajustamento. Para este processamento foram empregadas 24 horas de observações, com intervalo de processamento de 5 minutos e a observável de processamento foi a livre da ionosfera.

A figura 6.1 mostra que as discrepâncias para as componentes planimétricas foram inferiores a 2 cm e para as componentes altimétricas inferiores a 3 cm. O mesmo se pode dizer para as discrepâncias das demais estações, disponíveis no Apêndice A. Quanto ao desvio-padrão, verifica-se que as estações apresentaram valores em torno de 0,2 cm. A estação ZIMJ (Apêndice A) foi a que apresentou maiores desvios-padrão, chegando a quase 0,60 m.

Na legenda de cada gráfico é possível visualizar (entre os parênteses) a média das discrepâncias de todos os dias, bem como o desvio padrão das discrepâncias, para cada uma das três componentes. Para a estação WSTR, por exemplo, observa-se que a média das discrepâncias dos dez dias para a componente altimétrica (du) foi de 2 cm, e o desvio-padrão foi de 0,3 cm. Nota-se

que este desvio-padrão é diferente daquele mostrado na parte inferior do gráfico, que trata do valor estimado no processo de ajustamento de observações pelo programa Bernese.

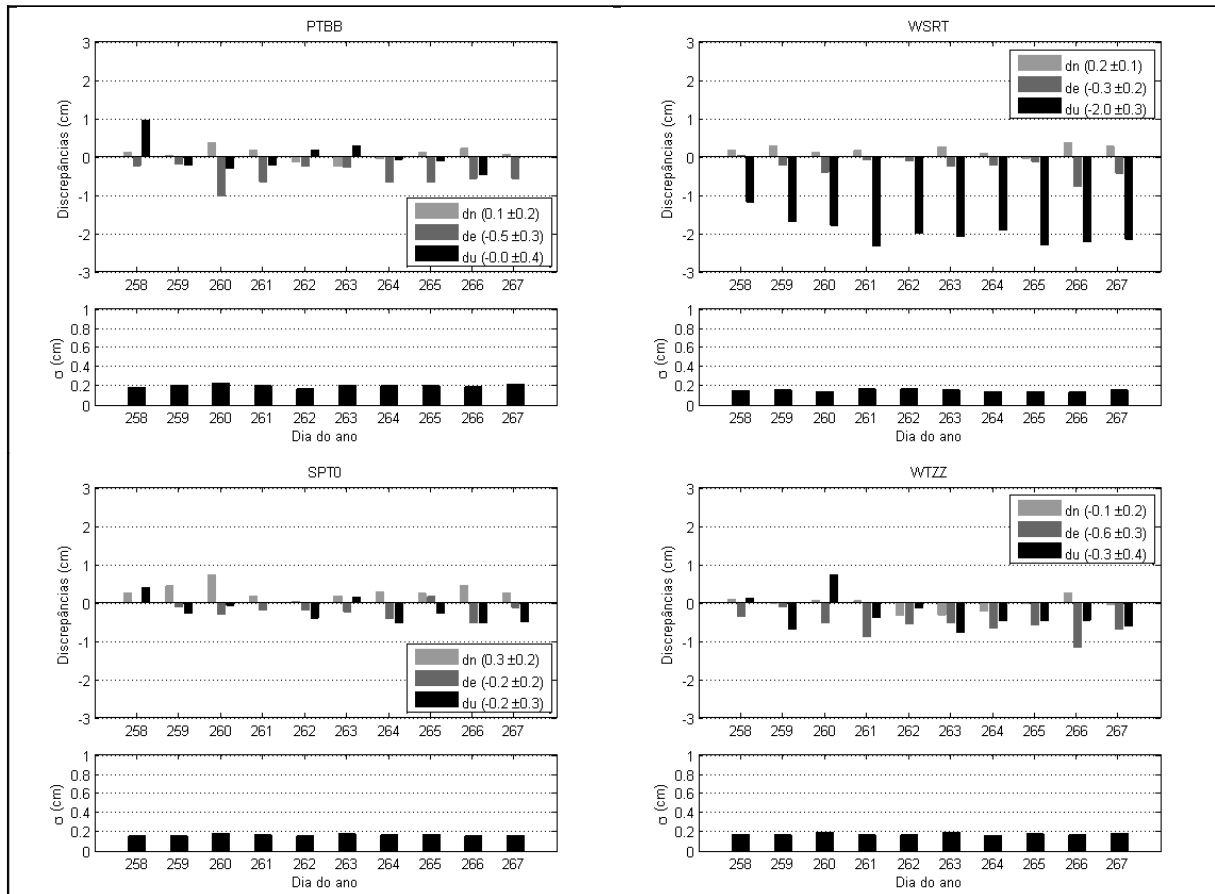


FIGURA 6.1 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₃) – EUROPA

NOTA: 24h de observações

Como as coordenadas das estações da RMBC obtidas do processamento se encontravam no sistema de referência das efemérides precisas, ITRF2005 (época de observação), e as coordenadas precisas no SIRGAS 2000 (época 2000.4), a transformação de Helmert Generalizada foi utilizada para converter as coordenadas do ITRF2005 para o ITRF2000 e assim permitir uma comparação direta entre as coordenadas processadas e conhecidas, em um sistema de referência compatível e em uma mesma época. Os parâmetros de transformação foram obtidos do sítio do ITRF (<http://itrf.ensg.ign.fr/>). Como a transformação de Helmert Generalizada necessita da velocidade das estações, optou-se em fazer uso da teoria de placas tectônicas para calcular as velocidades. O modelo geofísico NNR-NUVEL-1A foi

escolhido, cujas velocidades angulares para a placa litosférica América do Sul estão disponíveis em McCarthy (1996).

Com as coordenadas conhecidas e as processadas em um sistema de referência compatível e em uma mesma época, realizou-se o cálculo da diferença entre elas num sistema geodésico local, obtendo-se as componentes dn , de e du . A figura 6.2 ilustra as diferenças destas componentes para as oito estações da RBMC nos dez dias de processamento (193-202/2008). Neste caso, foram utilizadas as 24 horas de observações com intervalo de processamento de 5 minutos.

Nota-se nos gráficos da figura 6.2 que as diferenças na altimetria são aproximadamente duas vezes superiores que as da planimetria, além de uma tendência sistemática nas componentes planimétricas e a altimétrica, porém em sentido contrário. Os resultados estão de acordo com o esperado, Santerre (1991, p. 46) explica que se espera que os desvios-padrão para a altitude seja maior devido à alta correlação existente entre esta coordenada e o erro do relógio estimado. Na quase totalidade das amostras a componente norte mostrou diferenças superiores ao da componente este.

As discrepâncias foram inferiores a 3 cm para as componentes planimétricas e inferiores a 5 cm para as altimétricas. Todas as estações em todos os dias apresentaram desvios-padrão em torno de 0,25 cm. Observa-se que os resultados foram similares em todos os dias, com apenas algumas diferenças, indicando uma boa consistência das soluções.

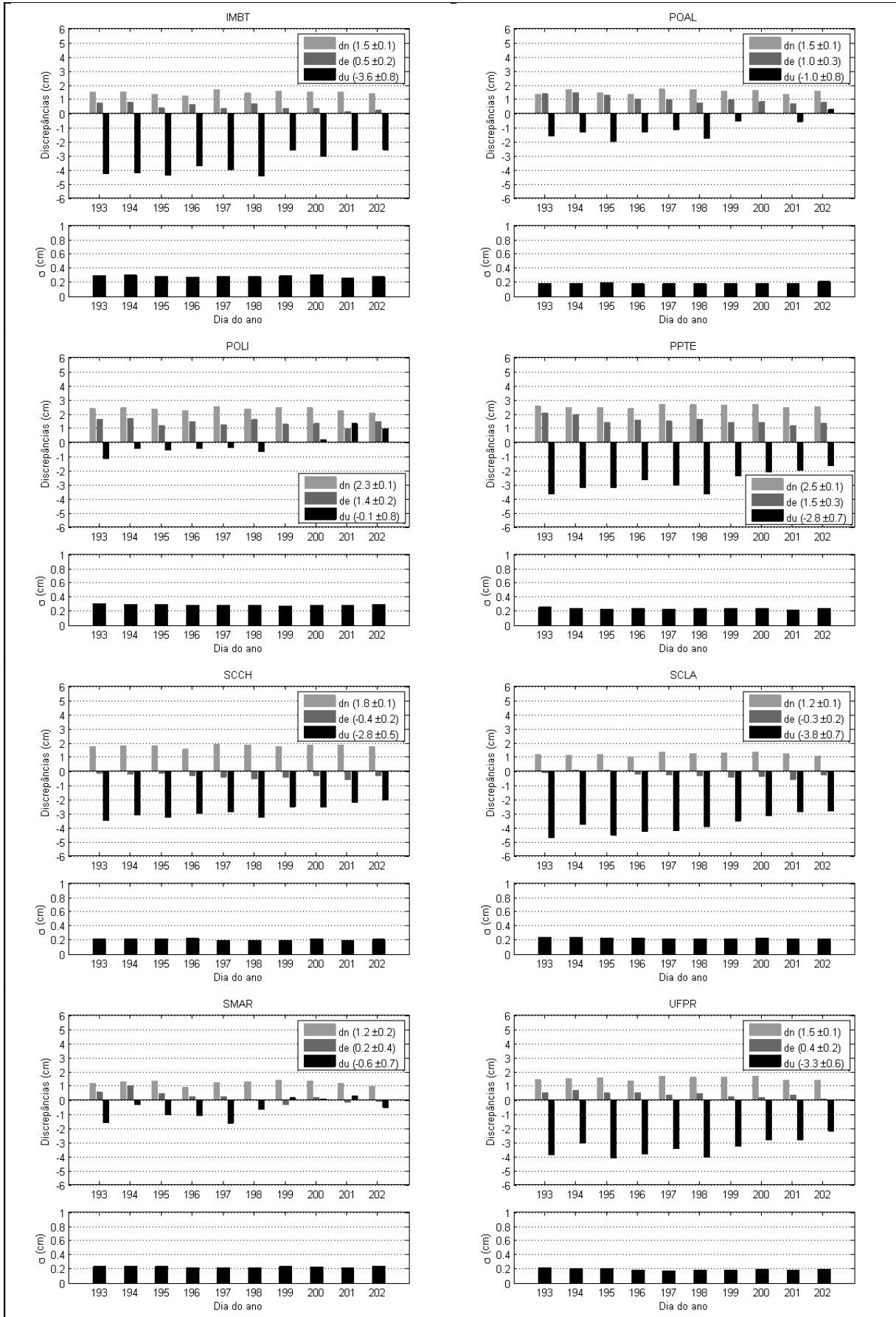


FIGURA 6.2 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₃) – BRASIL

NOTA: 24h de observações

As figuras 6.3 e 6.4 mostram os resultados do processamento PPP utilizando a observável livre da ionosfera mas desta vez empregando 6 horas de observações. O intervalo escolhido foi entre 12:00h e 18:00h (TUC), que cobre o período em que se espera maior atividade ionosférica 14h (hora local – HL). O intervalo de processamento foi reduzido para 30 segundos para que existisse uma quantidade de observações suficiente para o processamento.

O número de épocas utilizadas no processamento de 24 horas de dados, a cada 5 minutos, é de no máximo 288 épocas. Já o número de épocas utilizadas no processamento de um arquivo de 6 horas, a cada 30 segundos, é de 720 épocas, desde que existam observações em todas as épocas.

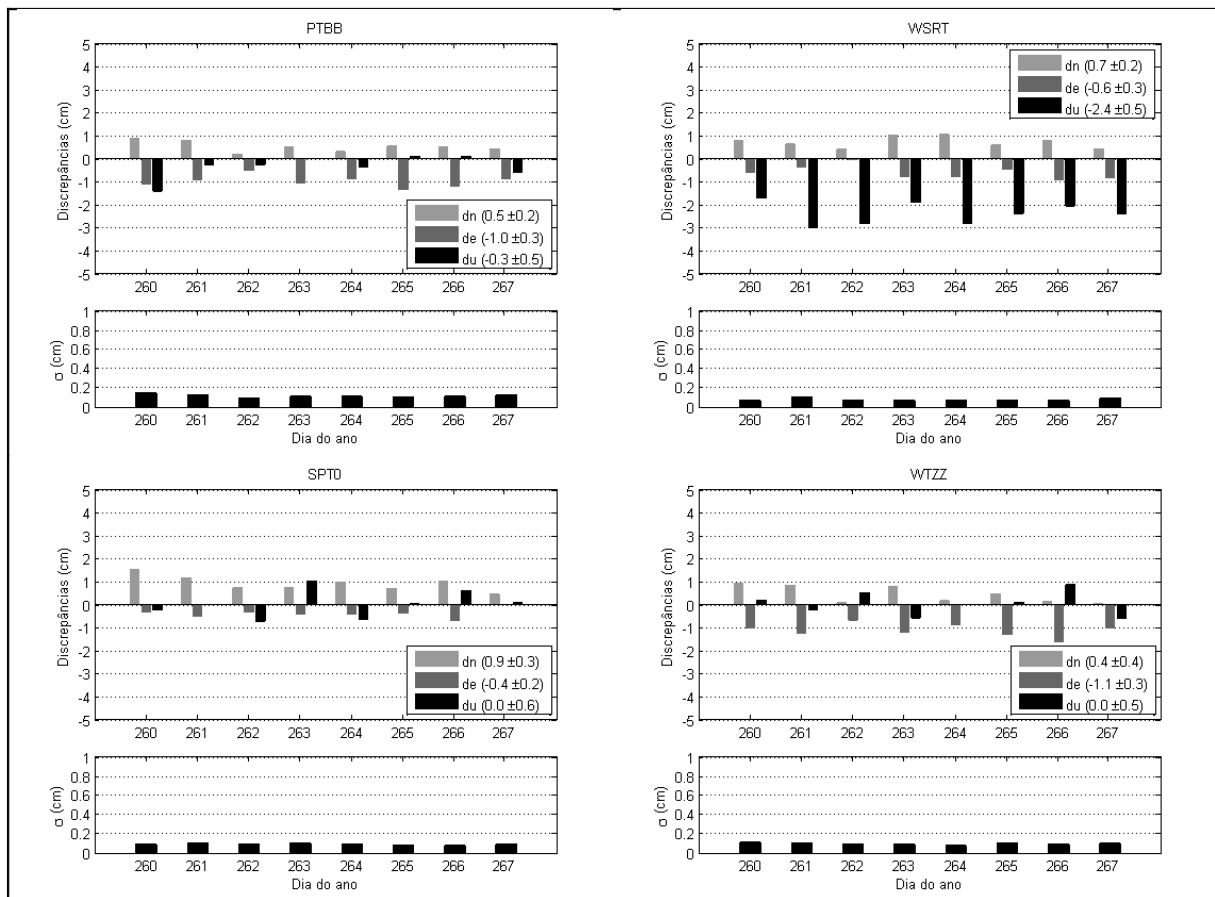


FIGURA 6.3 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L_3) – EUROPA

NOTA: 6h de observações

Comparando os resultados obtidos para 24 horas de observações (figura 6.1) com os de 6 horas (figura 6.3), nota-se que as discrepâncias foram praticamente da mesma ordem de grandeza, enquanto que os desvios-padrão para o processamento de 6 horas apresentaram valores menores, em torno de 0,10 cm.

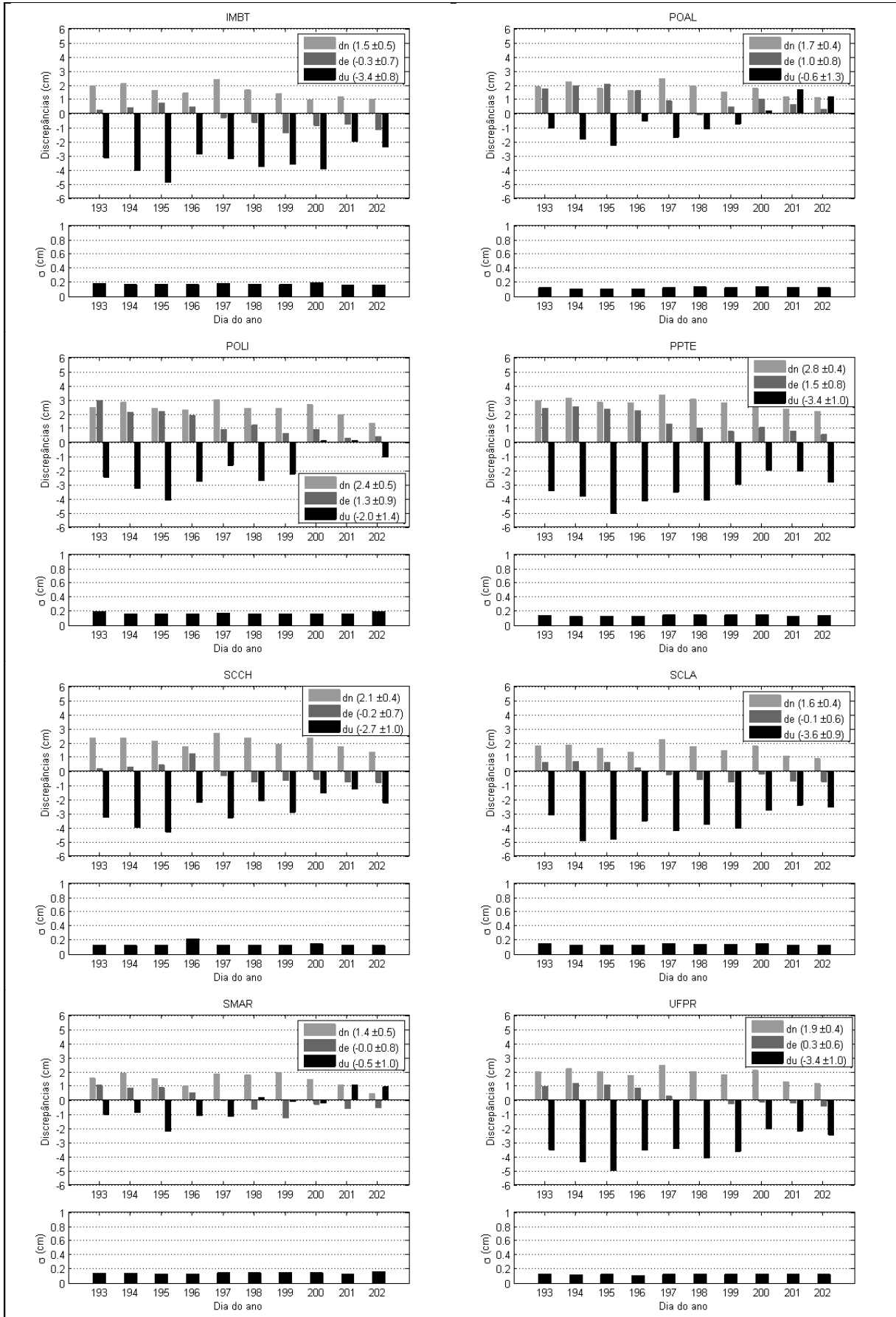


FIGURA 6.4 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₃) – BRASIL

NOTA: 6h de observações

Comparando os resultados do processamento de 24 horas para as estações brasileiras (figura 6.2), com o de 6 horas (figura 6.4), nota-se diferenças mais significativas para a altimetria, onde se observam discrepâncias maiores para o processamento de 6 horas, mas ainda assim as discrepâncias foram inferiores a 5 cm.

Tal como ocorreu com as estações européias, os desvios-padrão para o processamento de 6 horas apresentaram valores menores que a dos processamentos de 24 horas, sendo da ordem de 0,25 m.

6.1.2 PPP sem correção ionosférica (L_1)

Os resultados apresentados anteriormente (seção 6.1.1) utilizaram a observável livre da ionosfera. Nesta seção são apresentados os resultados do processamento utilizando apenas uma frequência (L_1), isto é, sem correção qualquer da ionosfera dentro do programa GPSEST. A única diferença entre os resultados dos processamentos anteriores e os que serão apresentados nesta seção está na mudança da observável de processamento (para L_1), mantendo todas as outras opções inalteradas. Desta forma, as diferenças entre os resultados anteriores e este deverão ser basicamente devido à ionosfera.

Mas como comentado anteriormente, em algumas etapas de pré-processamento, o programa Bernese utiliza observações de dupla frequência. Mesmo que o processamento com o GPSEST empregue apenas a observável L_1 , os resultados foram influenciados pela segunda frequência, portanto, os resultados obtidos são melhores do que aqueles que seriam obtidos caso fossem empregadas unicamente observações de uma frequência durante todo o processo.

A figura 6.5 mostra as discrepâncias e os desvios-padrão (do ajustamento) obtidos para as estações européias, além da média de todos os dias e o desvio-padrão das discrepâncias para os 10 dias para cada componente. Em muitos casos a componente norte foi a que apresentou as maiores discrepâncias, inclusive maiores que a altimétrica. A estação WSRT, por exemplo, mostra que as discrepâncias para a componente norte foram da ordem de 1 metro, em média,

enquanto que a altimétrica não chegou a ser maior que 0,60 m. Os desvios-padrão do ajustamento foram de aproximadamente 20 cm.

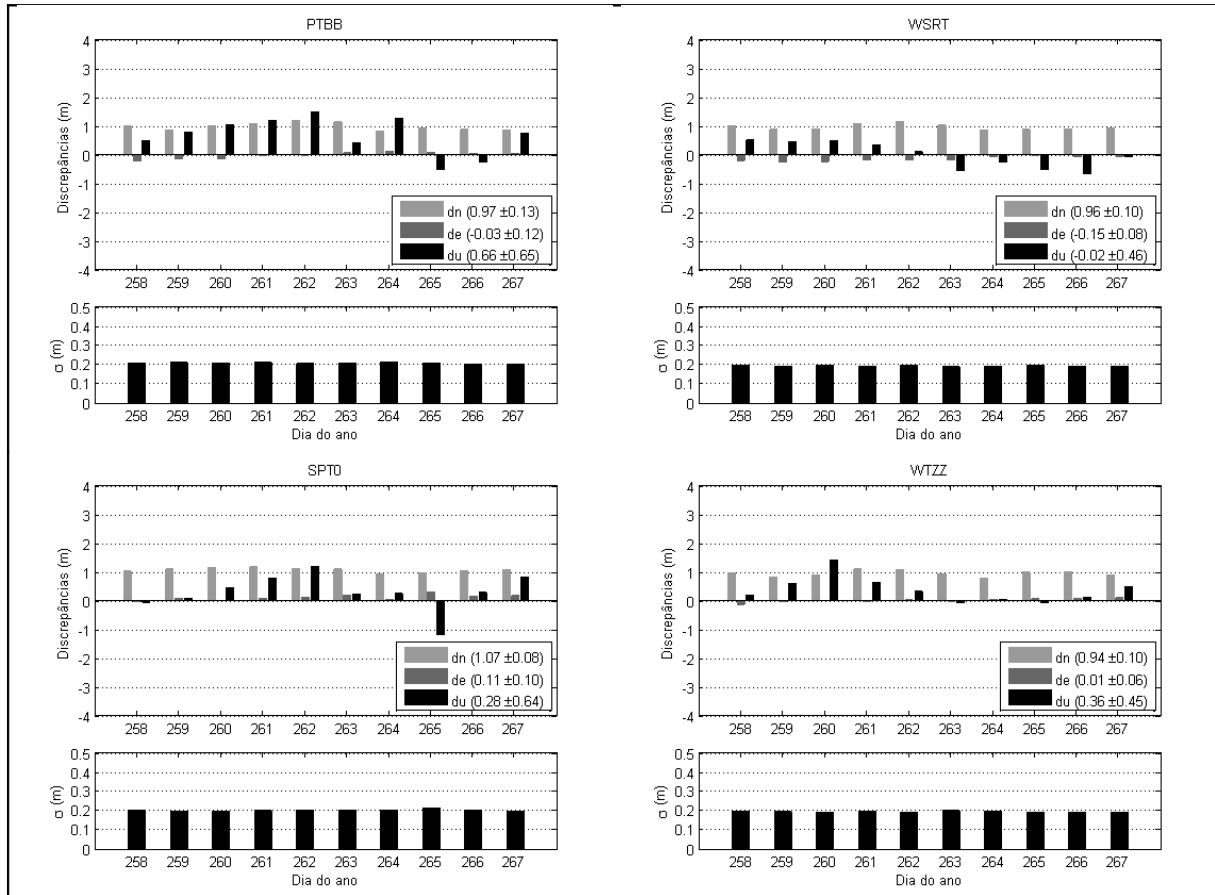


FIGURA 6.5 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L_1) – EUROPA

NOTA: 24h de observações

A figura 6.6 mostra os resultados do processamento sem qualquer correção ionosférica para as estações brasileiras. Verifica-se que as discrepâncias em altimetria foram maiores do que aquelas calculadas para as estações europeias, chegando a atingir mais de 3 metros. Diferentes das estações europeias em que a componente norte apresentou maiores discrepâncias que a este, para as estações brasileiras se verificou o contrário, discrepâncias maiores para a componente este (0,60 m, em média). Os desvios-padrão do ajustamento ficaram entre 0,20 e 0,30 m, valores estes que parecem ser superestimados, se for considerado a ordem de grandeza das discrepâncias apresentadas.

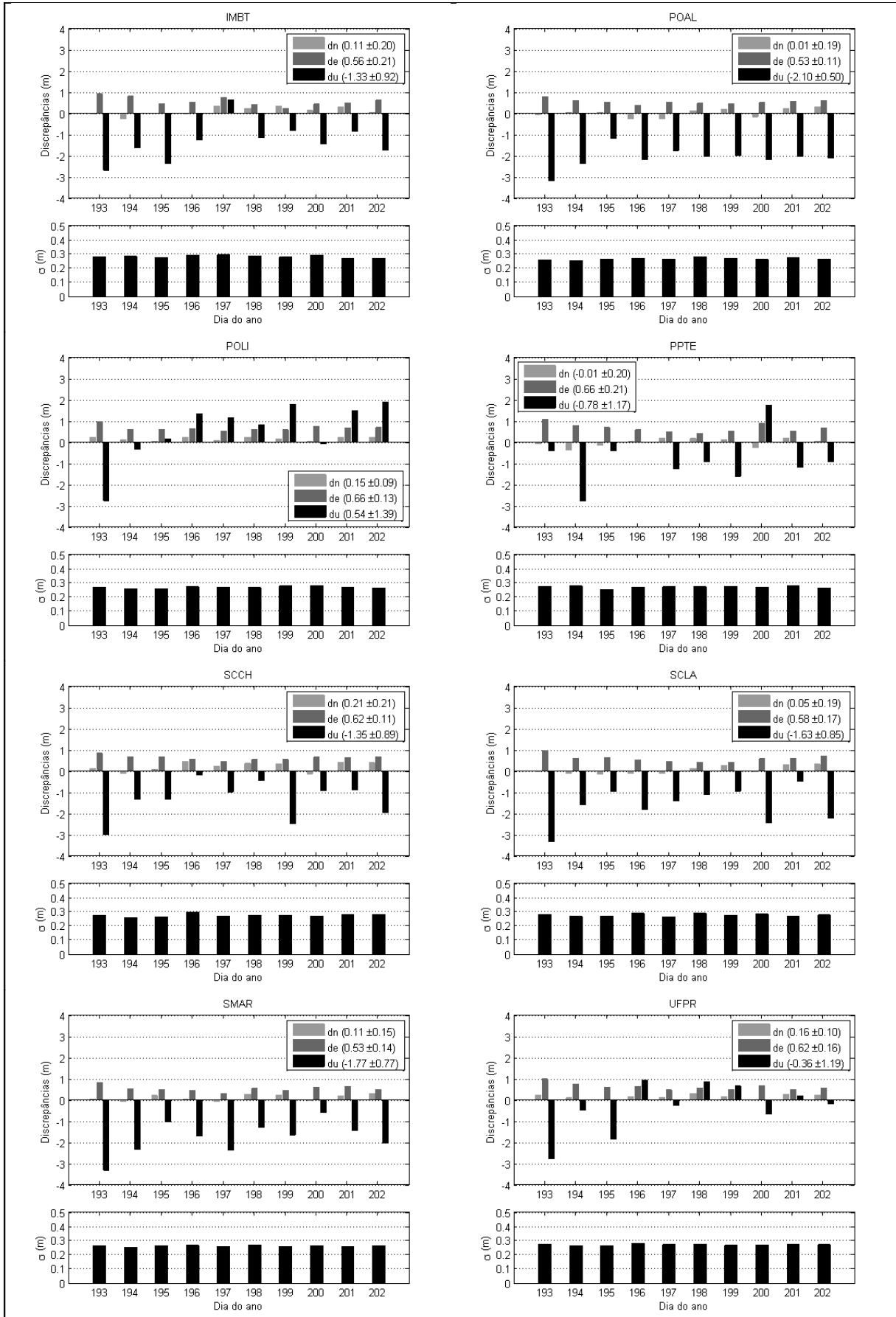


FIGURA 6.6 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₁) – BRASIL

NOTA: 24h de observações

6.1.3 PPP utilizando mapas globais de ionosfera ($L_1 + \text{GIM}$)

Nesta seção foram utilizados mapa globais de ionosfera, produzidos pelo CODE, para corrigir as observações das estações devido ao efeito da ionosfera. A figura 6.7 mostra um desses mapas, limitado para a região de estudo. A imagem da esquerda é um mapa de VTEC e a imagem da direita é o mapa de RMS (ingl. *Root Mean Square error*), ambas na unidade TECU. Os mapas são para o dia 266/2007, válido para o período entre 13:00 e 15:00 hora local (HL), um dia com atividade ionosférica moderada, segundo o índice Kp. Neste exemplo, os valores de VTEC variaram entre 4 e 12 TECU.

Observa-se no mapa de RMS do exemplo que os maiores valores estão na região noroeste, chegando a atingir valores de 1,1 TECU. Esta é uma região predominantemente oceânica, onde o número de estações GPS distribuídas nessa área é reduzido.

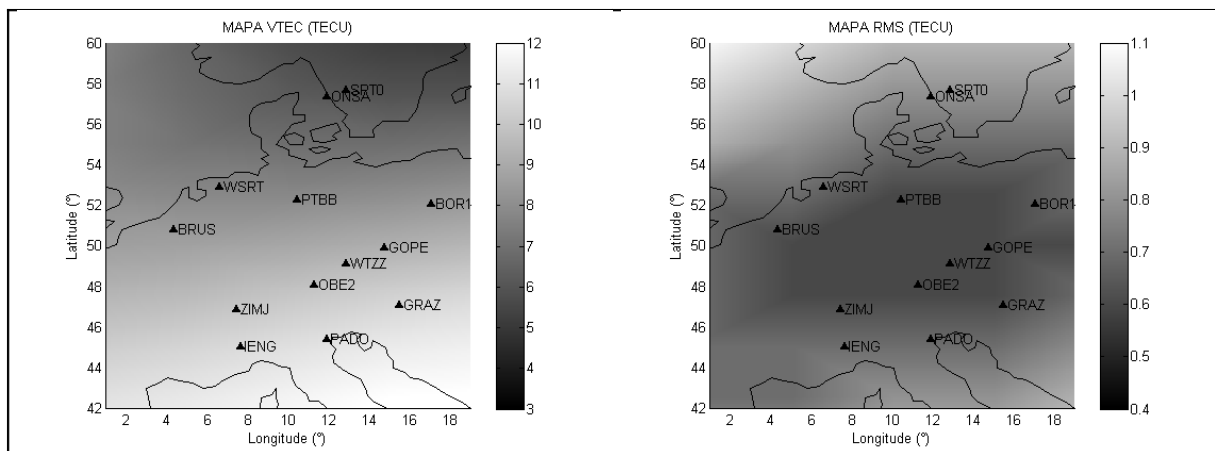


FIGURA 6.7 – MAPAS GLOBAIS DE IONOSFERA VTEC/RMS (CODE)

NOTA: Dia 266/2007, 13:00-15:00 HL

A figura 6.8 mostra os resultados do processamento PPP utilizando mapas globais de ionosfera para as estações européias. O programa GPSEST utilizou mapas globais no formato do programa Bernese. Comparando os resultados do processamento sem qualquer modelagem ionosférica (seção 6.1.2), observa-se que os resultados obtidos com os mapas de ionosfera foram melhores, especialmente para a componente altimétrica, mostrando que os mapas conseguiram eliminar em

parte os erros devido à ionosfera. Os desvios-padrão permaneceram aproximadamente os mesmos, em torno de 0,20 m.

Comparando os resultados obtidos com os mapas de ionosfera com aqueles do processamento que empregou a observável livre da ionosfera, constata-se que a modelagem não é acurada o suficiente para permitir o posicionamento preciso em que as discrepâncias esperadas são da ordem do centímetro.

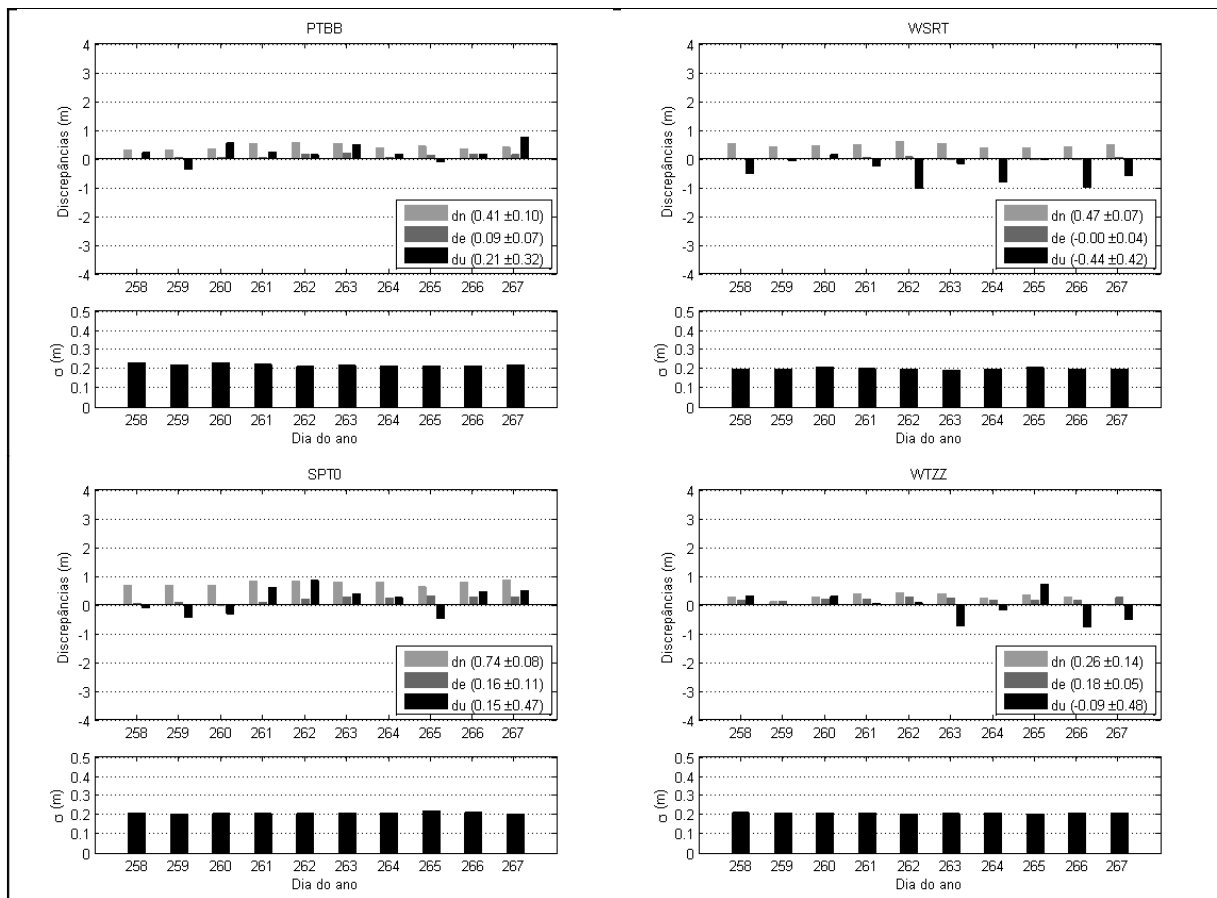


FIGURA 6.8 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₁+GIM) – EUROPA

NOTA: 24h de observações

A figura 6.9 mostra os resultados do processamento PPP com mapas globais de ionosfera para as estações brasileiras. Observa-se que os resultados, especialmente para a altimetria, foram piores utilizando mapas globais de ionosfera do que o processamento sem qualquer tipo de correção, chegando a ser maior que 4 metros em alguns casos. Uma das explicações pode ser devido ao fato de poucas estações sul-americanas participarem da modelagem global, pois, na Europa se notou uma melhora nos resultados com o emprego de mapas da ionosfera.

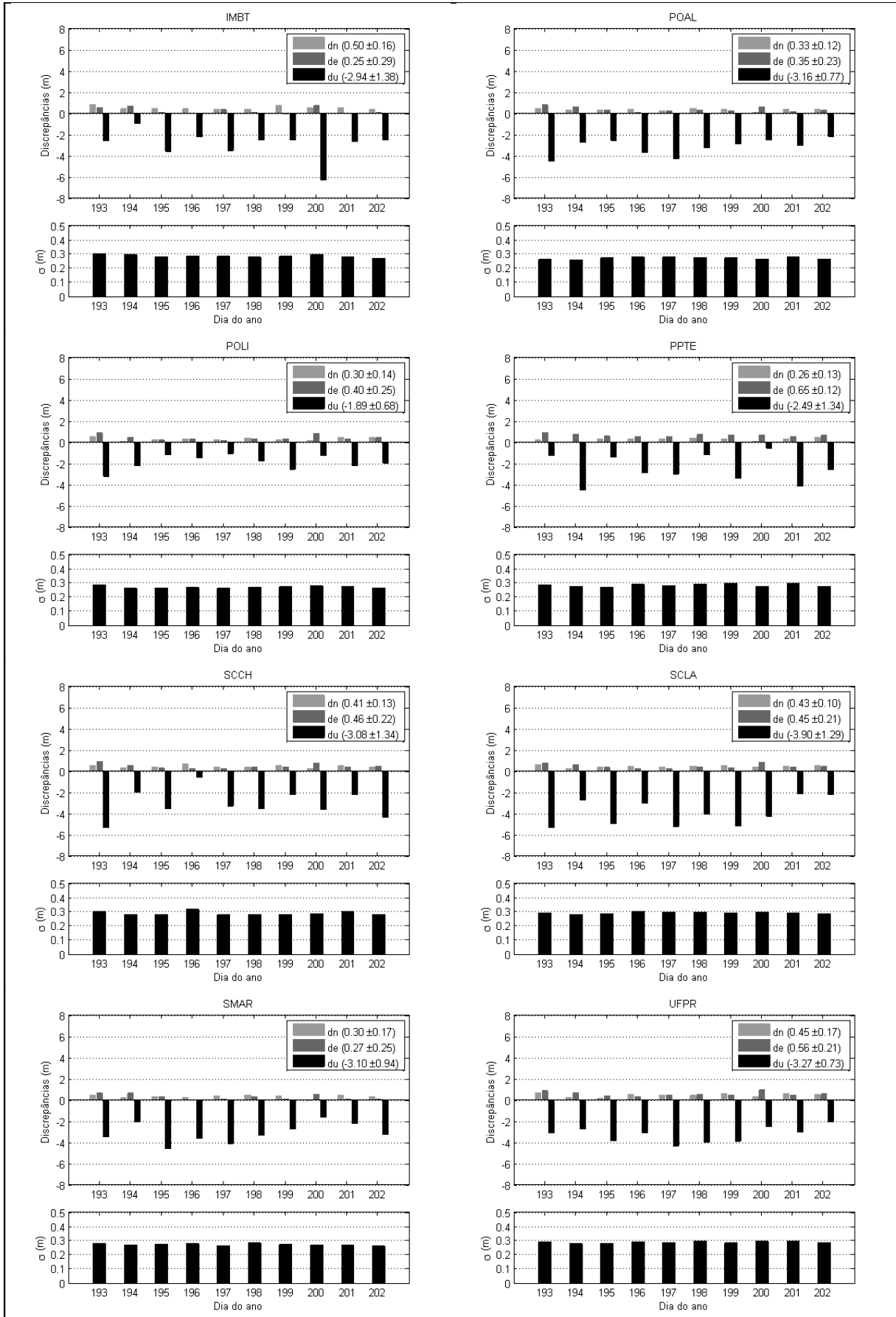


FIGURA 6.9 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L_1 +GIM) – BRASIL

NOTA: 24h de observações

6.1.4 PPP utilizando mapas regionais da ionosfera ($L_1 + RIM$)

Mapas regionais da ionosfera foram criados com o objetivo de corrigir as observações do efeito da ionosfera no processamento PPP e PP. Foi utilizado o modelo regional (seção 5.2.2) para gerar arquivos com os parâmetros ionosféricos, no formato Bernese (arquivos com extensão ION), e mapas regionais da ionosfera no formato IONEX (INX).

A figura 6.10 mostra um trecho do arquivo no formato Bernese com os parâmetros ionosféricos estimados para a região de estudo no Brasil para o dia 193/2008. Foram empregadas as oito estações da RBMC nesta modelagem, quando foram estimados os 36 coeficientes dos harmônicos esféricos que representam o efeito ionosférico nesta região.

PPP_081930: REGIONAL IONOSPHERE MODEL				19-FEB-09 11:17

MODEL NUMBER / STATION NAME	:	1930-00		
MODEL TYPE (1=LOCAL,2=GLOBAL,3=STATION)	:	2		
MAXIMUM DEGREE OF SPHERICAL HARMONICS	:	5		
MAXIMUM ORDER	:	5		
DEVELOPMENT WITH RESPECT TO				
GEOGRAPHICAL (=1) OR GEOMAGNETIC (=2) FRAME	:	2		
MEAN (=1) OR TRUE (=2) POSITION OF THE SUN	:	1		
MAPPING FUNCTION (0=NONE,1=COSZ,2=MSLM,3=ESM)	:	2		
HEIGHT OF SINGLE LAYER AND ITS RMS ERROR (KM)	:	450.00	0.00	
COORDINATES OF EARTH-CENTERED DIPOLE AXIS				
LATITUDE OF NORTH GEOMAGNETIC POLE (DEGREES)	:	79.00		
EAST LONGITUDE (DEGREES)	:	-71.00		
PERIOD OF VALIDITY				
FROM EPOCH / REFERENCE EPOCH (Y,M,D,H,M,S)	:	2008 07 11 00 00 00		
TO EPOCH	:	2008 07 12 00 00 00		
LATITUDE BAND COVERED				
MINIMUM LATITUDE (DEGREES)	:	-27.92		
MAXIMUM LATITUDE (DEGREES)	:	-1.55		
ADDITIONAL INFORMATION				
NUMBER OF CONTRIBUTING STATIONS	:	8		
NUMBER OF CONTRIBUTING SATELLITES	:	31		
ELEVATION CUT-OFF ANGLE (DEGREES)	:	15		
MAXIMUM TEC AND ITS RMS ERROR (TECU)	:	21.91	0.22	
COMMENT / WARNING	:			
COEFFICIENTS				
DEGREE	ORDER	VALUE (TECU)	RMS (TECU)	
0	0	-65.87488758	92.3151	
1	0	-209.53319817	144.0110	
1	1	4.53762134	7.3300	
...				
5	5	0.12237156	0.0030	
5	-5	0.07120013	0.0028	

FIGURA 6.10 – TRECHO DE UM ARQUIVO CONTENDO PARÂMETROS IONOSFÉRICOS

A figura 6.11 mostra um trecho do arquivo no formato IONEX contendo valores de VTEC estimados para a região brasileira em estudo para o dia 193/2008. O arquivo contém 24 grades (uma para cada hora do dia) com dimensões de 10°x10°, e resolução espacial de 1° em latitude e longitude. Cada ponto da grade está associado a um valor de VTEC, cuja unidade é 0,1 TECU. O usuário que deseja obter o VTEC para sua posição, pode realizar uma interpolação utilizando os pontos da grade. O arquivo também contém os DCB (em *nano* segundos) estimados para cada uma das estações que participaram do processo de modelagem ionosférica.

1.0	IONOSPHERE MAPS	GPS	IONEX VERSION / TYPE								
GPSEST V5.0	My agency/institute		19-FEB-09	11:17	PGM / RUN BY / DATE						
PPP_081930:	REGIONAL IONOSPHERE MODEL		COMMENT								
My description text	DESCRIPTION										
2008	7	11	0	0	0	EPOCH OF FIRST MAP					
2008	7	12	0	0	0	EPOCH OF LAST MAP					
3600	INTERVAL										
25	# OF MAPS IN FILE										
NONE	MAPPING FUNCTION										
15.0	ELEVATION CUTOFF										
Undifferenced carrier phase and code	OBSERVABLES USED										
8	# OF STATIONS										
31	# OF SATELLITES										
6371.0	BASE RADIUS										
2	MAP DIMENSION										
450.0	450.0	0.0	HGT1 / HGT2 / DHGT								
-21.0	-31.0	-1.0	LAT1 / LAT2 / DLAT								
-55.0	-45.0	1.0	LON1 / LON2 / DLON								
-1	EXPONENT										
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available	COMMENT										
List of stations:	COMMENT										
imbt poal poli ppte scch scla smar ufpr	COMMENT										
DIFFERENTIAL CODE BIASES	START OF AUX DATA										
IMBT 94024			17.410	0.480	STATION / BIAS / RMS						
POAL 91850			16.400	0.431	STATION / BIAS / RMS						
POLI 93800			5.045	0.451	STATION / BIAS / RMS						
PPTTE 93900			30.290	0.448	STATION / BIAS / RMS						
SCCH 94026			17.098	0.432	STATION / BIAS / RMS						
SCLA 94025			14.887	0.432	STATION / BIAS / RMS						
SMAR 92013			18.894	0.430	STATION / BIAS / RMS						
UFPR 93970			18.338	0.434	STATION / BIAS / RMS						
DCB values in ns; zero-mean condition wrt satellite values	COMMENT										
DIFFERENTIAL CODE BIASES	END OF AUX DATA										
	END OF HEADER										
1	START OF TEC MAP										
2008	7	11	0	0	0	EPOCH OF CURRENT MAP					
-21.0	-55.0	-45.0	1.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H						
52	51	50	49	49	48	47	47	47	46	46	
-22.0	-55.0	-45.0	1.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H						
52	51	50	49	49	48	48	47	47	47	46	
...											
-31.0	-55.0	-45.0	1.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H						
32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	
1	END OF TEC MAP										

FIGURA 6.11 – TECHO DE UM ARQUIVO NO FORMATO IONEX

A figura 6.12 mostra os mapas de VTEC e RMS gerados para as estações europeias no dia 266/2007 para as 02:00h e 14:00h (HL). No período noturno a variação do VTEC, neste exemplo, foi entre 0 e 8 TECU, e no período vespertino se observa um aumento significativo do VTEC, variando entre 7 e 14 TECU. Os mapas de RMS apresentam diferenças, principalmente na região sul, variando entre 0,2 e 0,4 TECU para ambos os casos.

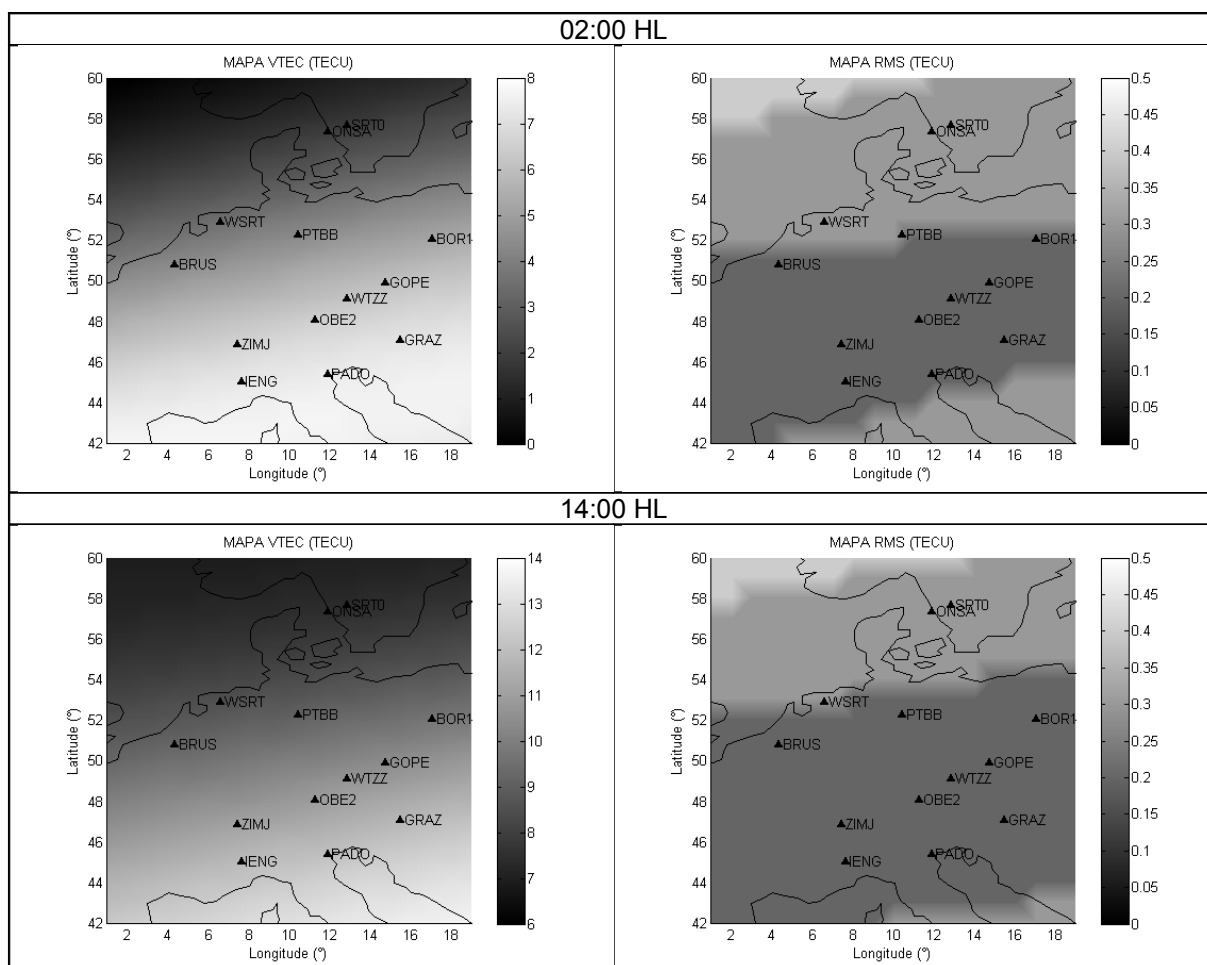


FIGURA 6.12 – MAPAS REGIONAIS DE IONOSFERA VTEC/RMS – EUROPA
NOTA: Dia 266/2007

A figura 6.13 mostra os mapas de VTEC e RMS na região sul do Brasil para o dia 193/2008. Os mapas são para às 02:00h e 14:00h (HL). Para o exemplo, a variação no período noturno foi entre 1 e 3 TECU, e no período vespertino entre 11 a 17 TECU. Os mapas de RMS foram da ordem de 0,4 TECU para os dois horários. De forma geral os mapas para os demais dias tiveram comportamentos semelhantes aos apresentados.

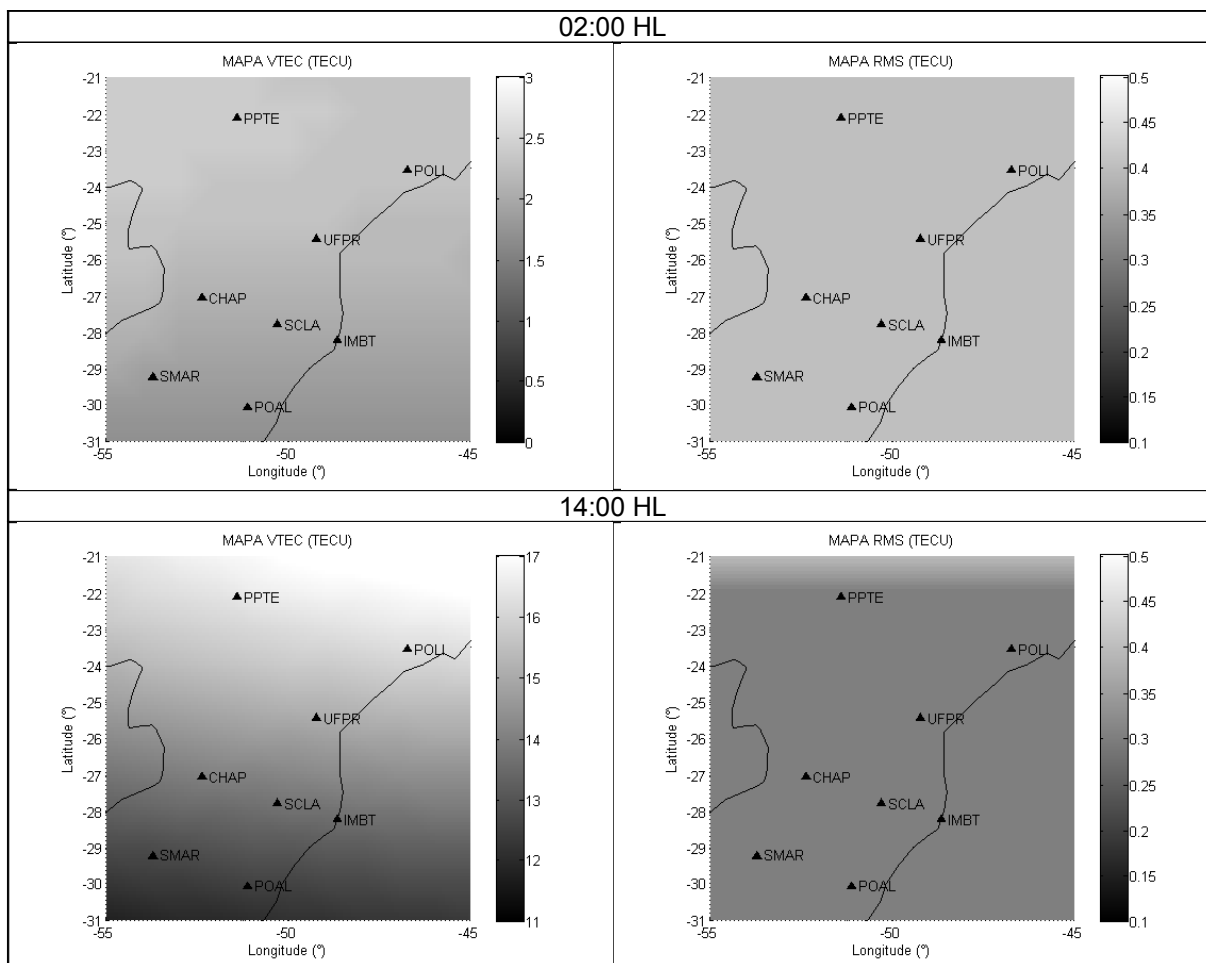


FIGURA 6.13 – MAPAS REGIONAIS DE IONOSFERA VTEC/RMS – BRASIL
 NOTA: Dia 194/2008

Os mapas de ionosfera gerados pelo Bernese no formato próprio foram utilizados no processamento PPP, onde a observável básica de processamento foi L_1 . As figuras 6.14 e 6.15 mostram os resultados do processamento para as estações europeias e brasileiras, respectivamente.

Para as estações europeias, comparando os resultados obtidos com a utilização dos mapas regionais de ionosfera com aqueles sem correção do efeito ionosférico (seção 6.1.2), verifica-se uma melhora nos resultados, especialmente para a componente altimétrica. Agora comparando os os resultados obtidos com a ajuda de mapas globais de ionosfera não se observa nenhuma melhora.

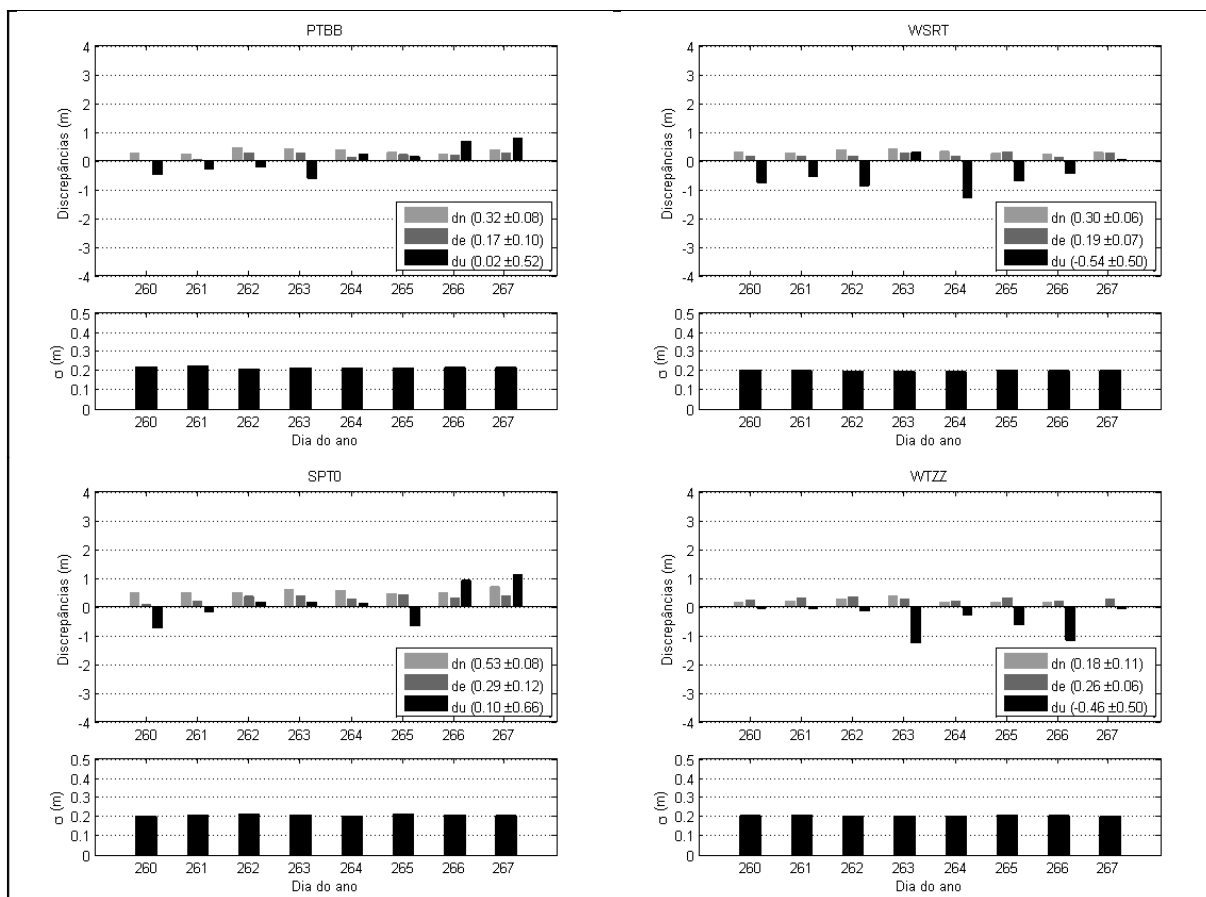


FIGURA 6.14 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₁+RIM) – EUROPA

NOTA: 24h de observações

Para as estações brasileiras se verifica que a utilização de mapas de ionosfera não trouxe benefícios ao posicionamento, como mostra a figura 6.15.

Em ambas as regiões de estudo, nota-se que em nenhum dos casos a introdução de mapas regionais de ionosfera conseguiu corrigir o efeito ionosférico de forma a proporcionar resultados acurados, como aconteceu quando a observável livre da ionosfera foi utilizada.

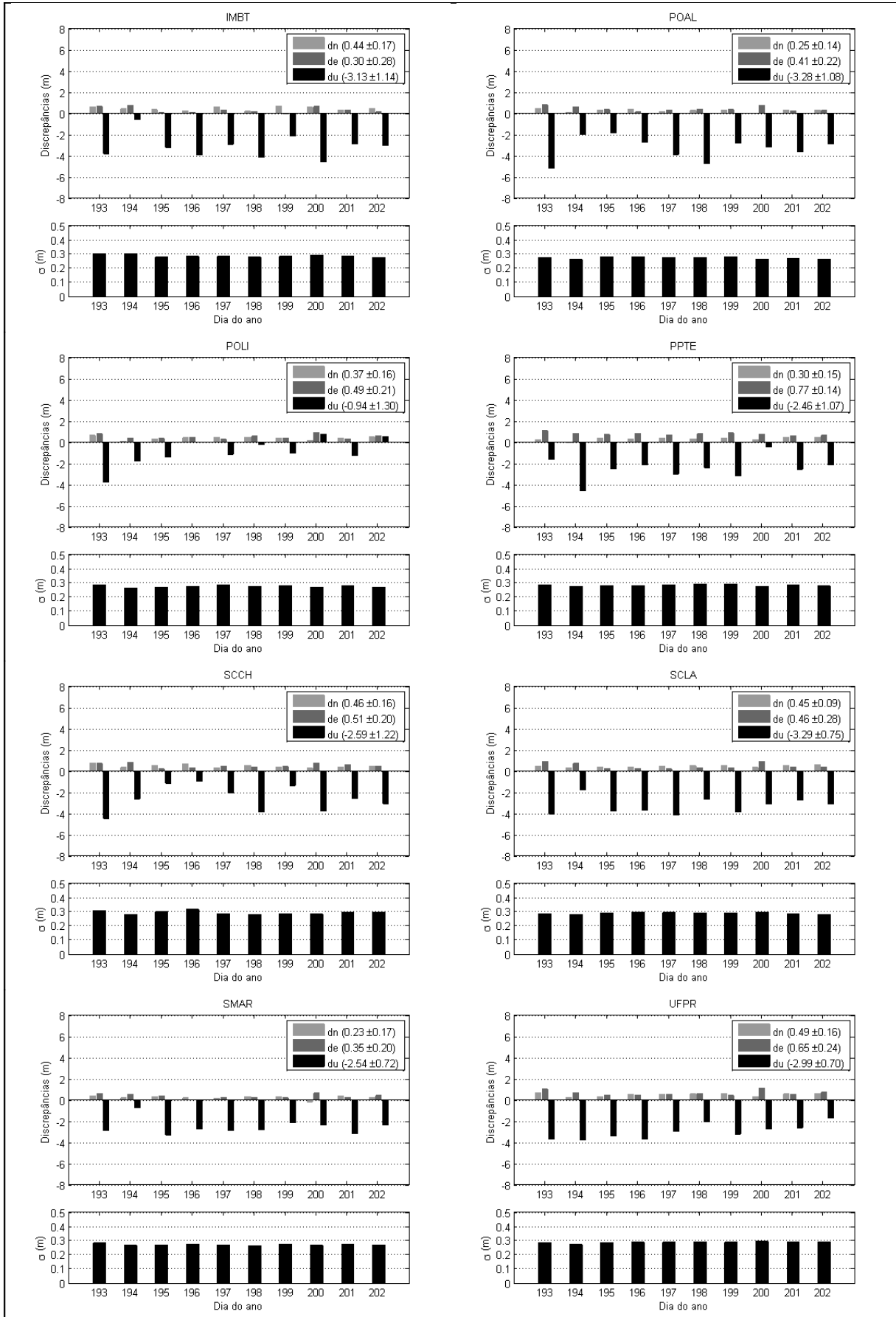


FIGURA 6.15 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PPP (L₁+RIM) – BRASIL

NOTA: 24h de observações

6.2 POSICIONAMENTO POR PONTO

Nas próximas seções serão mostrados os resultados para o posicionamento por ponto (PP), onde são empregados somente observações do código. As estratégias de processamento utilizadas foram: processamento com a observável livre da ionosfera (P_3); sem considerar o efeito da ionosfera (P_1 ou C/A); empregando mapas regionais de ionosfera (P_1 ou C/A + RIM) e o processamento com a modelagem local implementada (P_1 ou C/A + LTM). Antes de se apresentar os resultados desta última estratégia, são analisados alguns fatores que indicam a qualidade da modelagem.

Nos experimentos conduzidos neste capítulo, somente os resultados do processamento de 6 horas de observações são apresentados, onde o intervalo de processamento foi de 30 segundos. O processamento de 24 horas de observações não mostrou significativa melhora para o posicionamento, por isso se optou em trabalhar com um intervalo de tempo menor.

O principal programa do Bernese para o processamento com o código é o CODSP. Nele é possível escolher a observável de processamento (uma frequência, ou combinação linear) dentre outros parâmetros. O programa estima os parâmetros e suas respectivas precisões.

Novamente é necessário lembrar que devido à influência da segunda frequência em algumas etapas do processamento (detecção de perdas de ciclo e suavização da pseudodistância), os resultados apresentados quando não se emprega a combinação livre da ionosfera é melhor do que seria se fossem empregadas observações de apenas uma frequência durante todo o processamento.

6.2.1 PP com a observável livre da ionosfera (P_3)

As figuras 6.16 e 6.17 mostram os resultados para o processamento PP utilizando a observável livre da ionosfera (P_3) para as estações européias e brasileiras, respectivamente. Em ambos os casos as pseudodistâncias foram suavizadas pela onda portadora.

As estações europeias (figura 6.16) apresentaram discrepâncias inferiores a 0,80 m para todas as três componentes (dn , de e du) e todas as estações, inclusive aquelas cujos resultados se encontram no Apêndice A. Os desvios-padrão foram de 0,20 m, com exceção da estação ZIMJ que apresentou valores de até um metro.

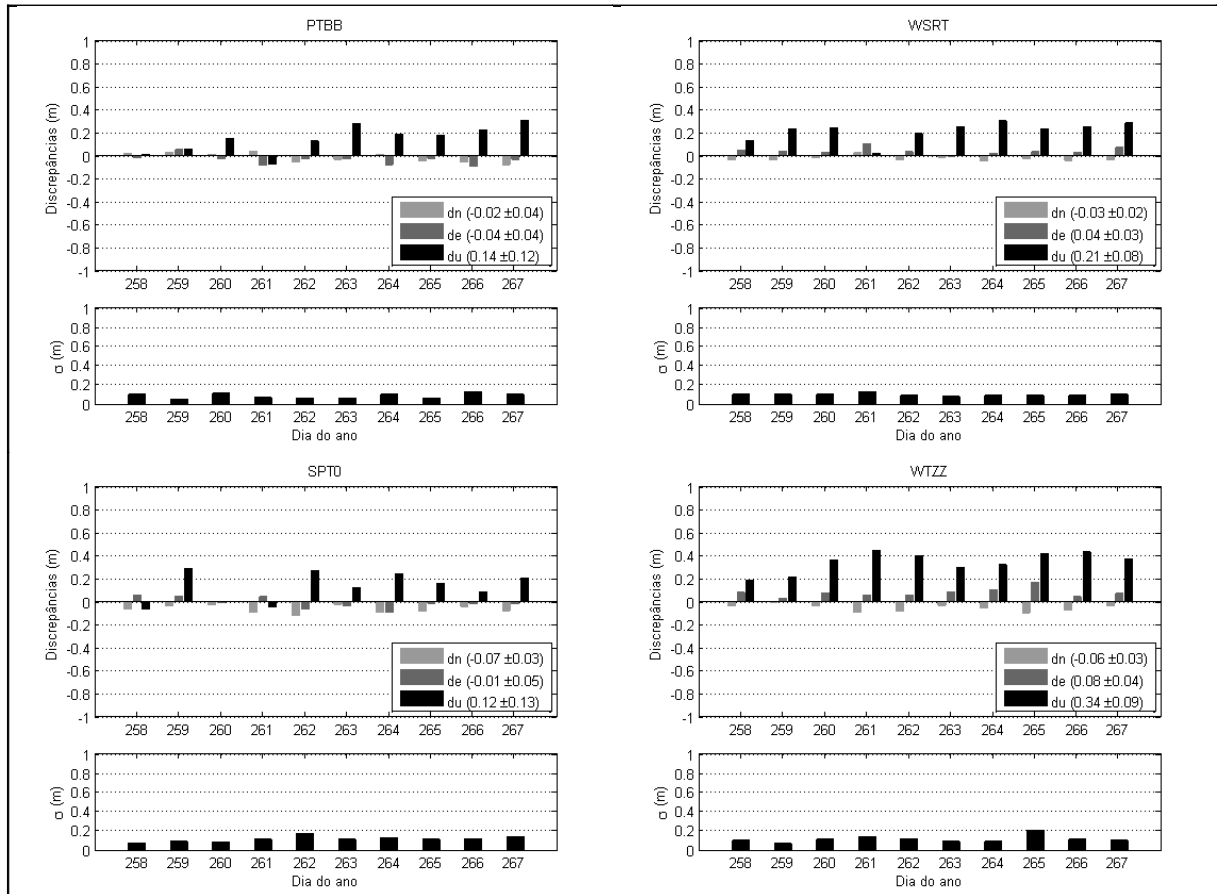


FIGURA 6.16 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P_3)– EUROPA
NOTA: Observações suavizadas

As estações brasileiras apresentaram discrepâncias inferiores a 0,60 m para todas as três componentes, em todos os dias (figura 6.17). Assim como nas estações europeias, a discrepância em altimetria foi superior ao da planimetria, e os desvios-padrão foram da ordem de 0,20 m.

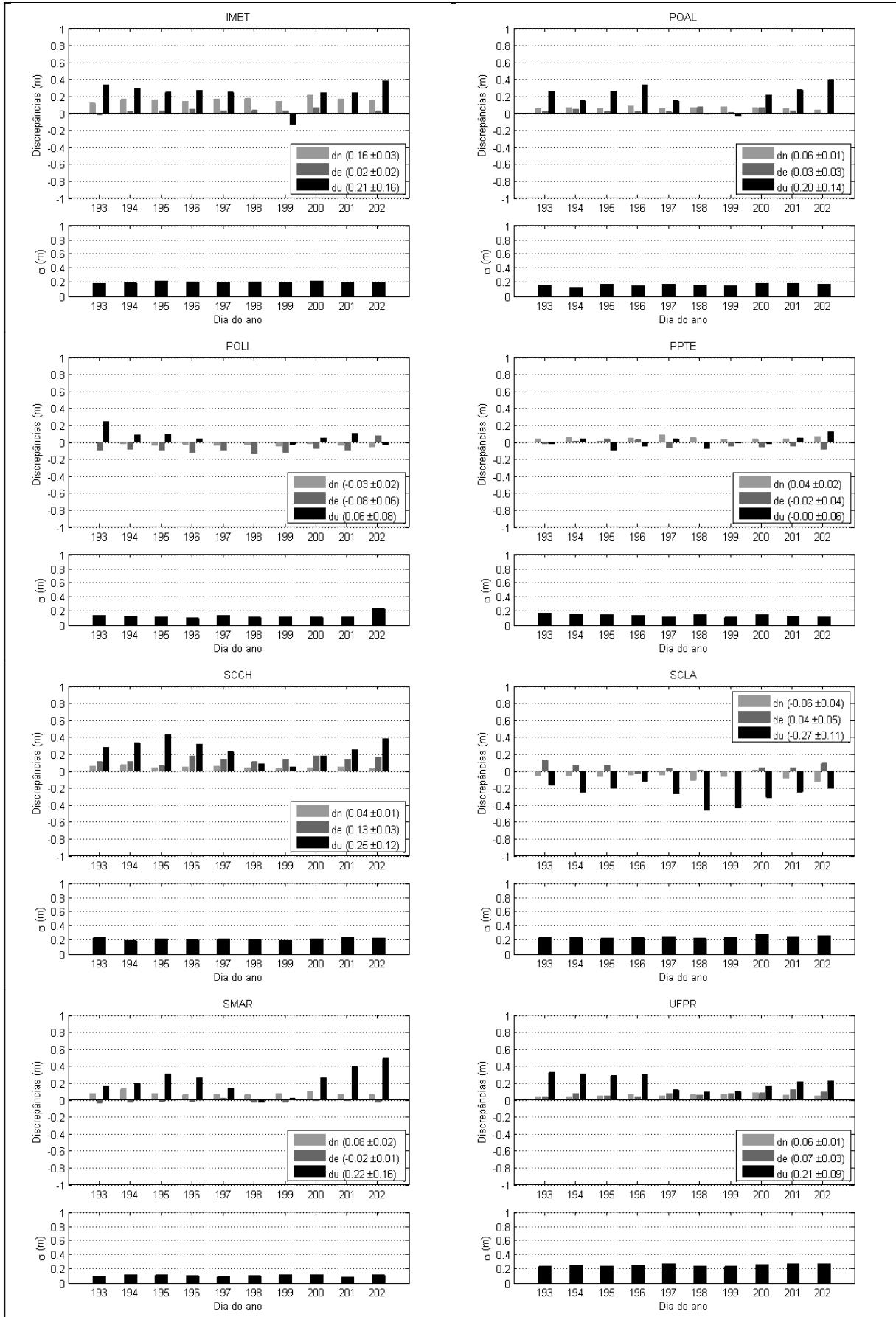


FIGURA 6.17 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P₃) – BRASIL
 NOTA: Observações suavizadas

As figuras 6.18 e 6.19 mostram os resultados do processamento PP com a observável livre da ionosfera, mas desta vez as observações não foram suavizadas pela fase da onda portadora.

Para as estações europeias (figura 6.18), nota-se algumas diferenças nas discrepâncias obtidas em cada estação em cada dia. Para as estações BOR1, GRAZ e PADO (Apêndice A), no entanto, as diferenças foram maiores, quando as discrepâncias para a componente altimétrica chegaram a ser maiores que o metro em alguns casos. Os desvios-padrão oriundos do processamento sem a suavização mostram valores superiores aos obtidos com a observável suavizada. Nota-se como o ruído presente nas observações de código originais são nitidamente identificadas pelo desvio-padrão, valores que antes eram de 0,20 m agora chegam a ser de 1 metro ou maior.

Para as estações brasileiras (figura 6.19), nota-se maiores discrepâncias para a componente altimétrica e os desvios-padrão ficaram entre 0,6 e 1,2 m.

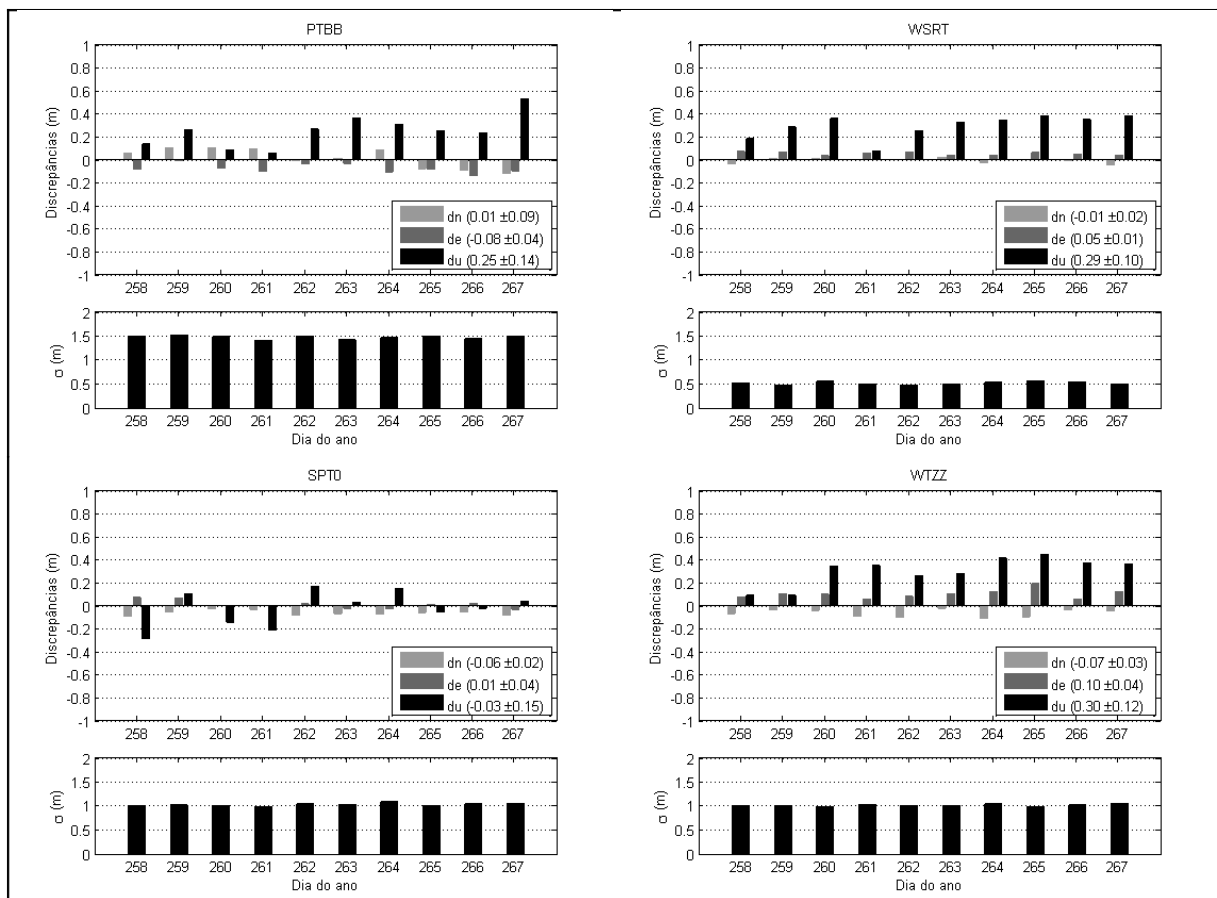


FIGURA 6.18 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P_3) – EUROPA

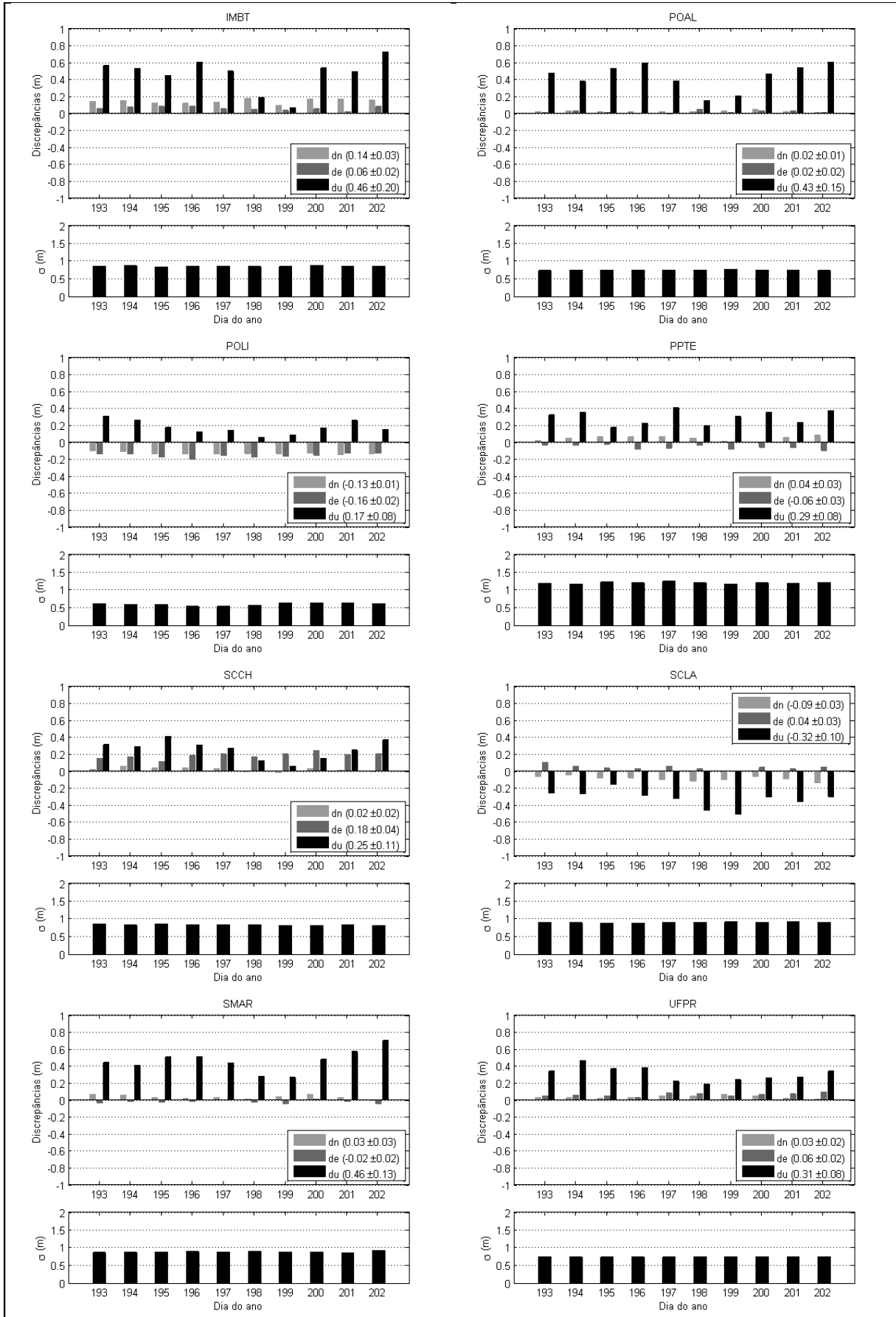


FIGURA 6.19 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P_3) – BRASIL

6.2.2 PP sem correção ionosférica (P_1 ou C/A)

As figuras 6.20 e 6.21 mostram os resultados do processamento P_1 para as estações europeias e C/A para as brasileiras, sem corrigir o efeito ionosférico. As observações não foram suavizadas pela onda portadora. Para as estações europeias se verificam discrepâncias altimétricas médias da ordem de 3 metros e de até 0,8 metro para a componente norte, em média.

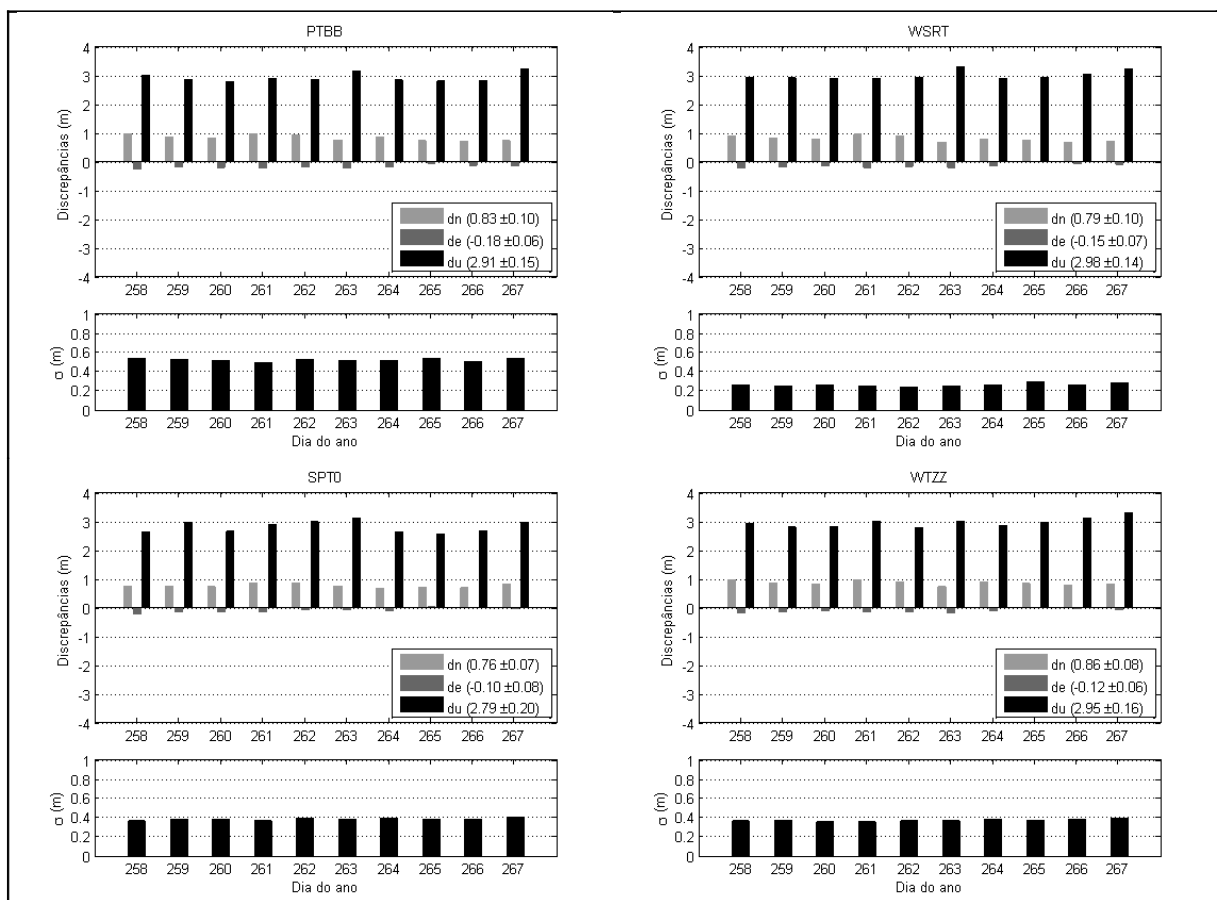


FIGURA 6.20 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P_1) – EUROPA

As estações brasileiras também apresentam discrepâncias de até 3 metros para a componente altimétrica, e de 60 cm para a componente norte, em média. Discrepâncias da ordem de metros são esperadas no posicionamento que utiliza a observável P_1 ou C/A sem correção ionosférica. Os desvios-padrão variaram entre 0,30 m e 0,60 m em ambos os casos.

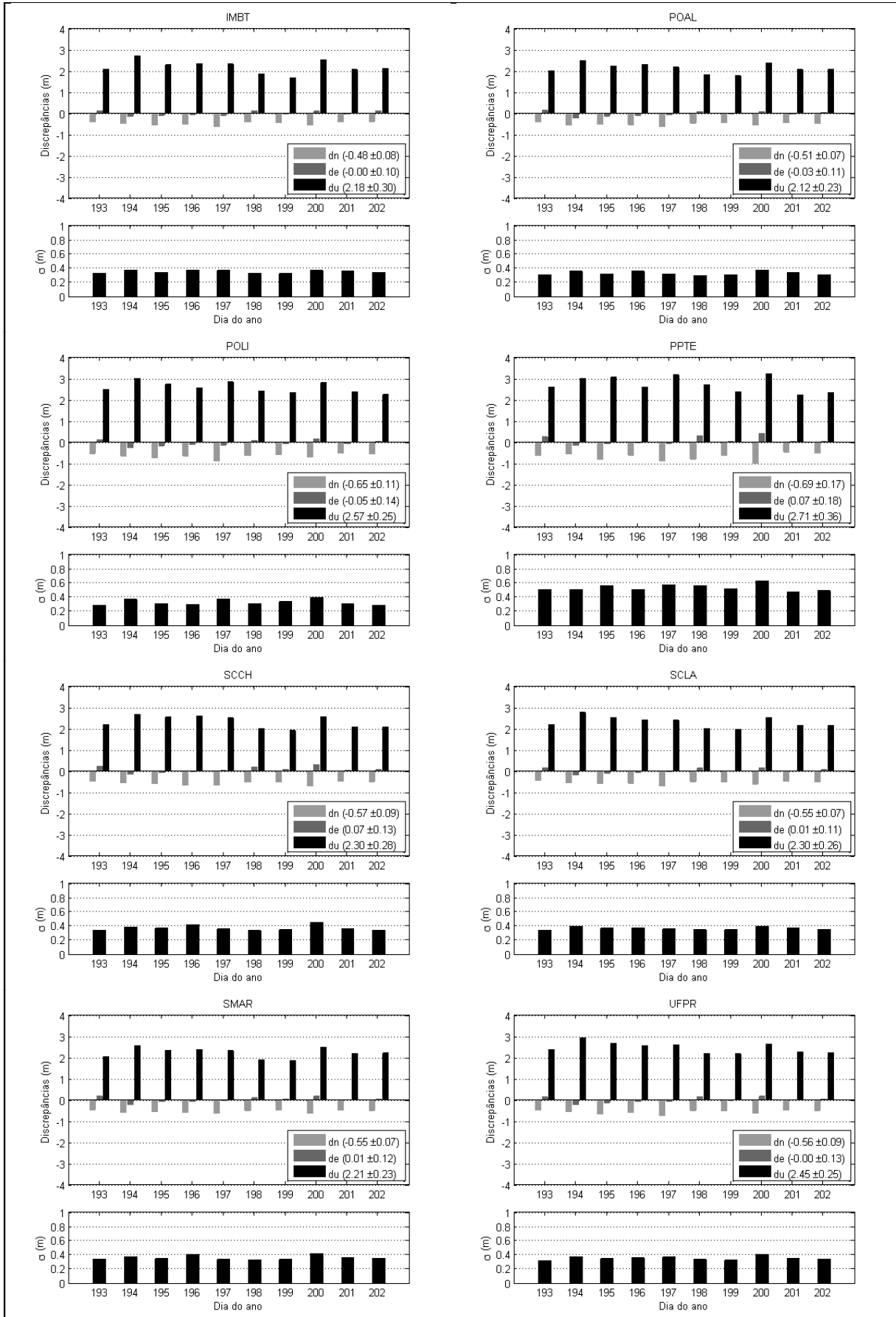


FIGURA 6.21 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (C/A) – BRASIL

6.2.3 PP utilizando mapas regionais de ionosfera ($P_1 + RIM$)

O programa CODSPP não permite a entrada de mapas de ionosfera para a correção deste erro durante o processamento. Como comentado anteriormente, o programa desenvolvido foi adaptado para operar com um módulo para a leitura e interpolação dos valores de VTEC oriundos de arquivos no formato IONEX.

As figuras 6.22 e 6.23 mostram os resultados do processamento PP empregando mapas regionais de ionosfera. Nestes processamentos as observações foram suavizadas pela fase da onda portadora, com o objetivo de se obter os resultados mais precisos. Estes mapas foram os mesmos utilizados no processamento PPP (seção 6.1.4). Nota-se nas figuras que a suavização permitiu a obtenção de resultados com desvios-padrão em torno de 0,20 m.

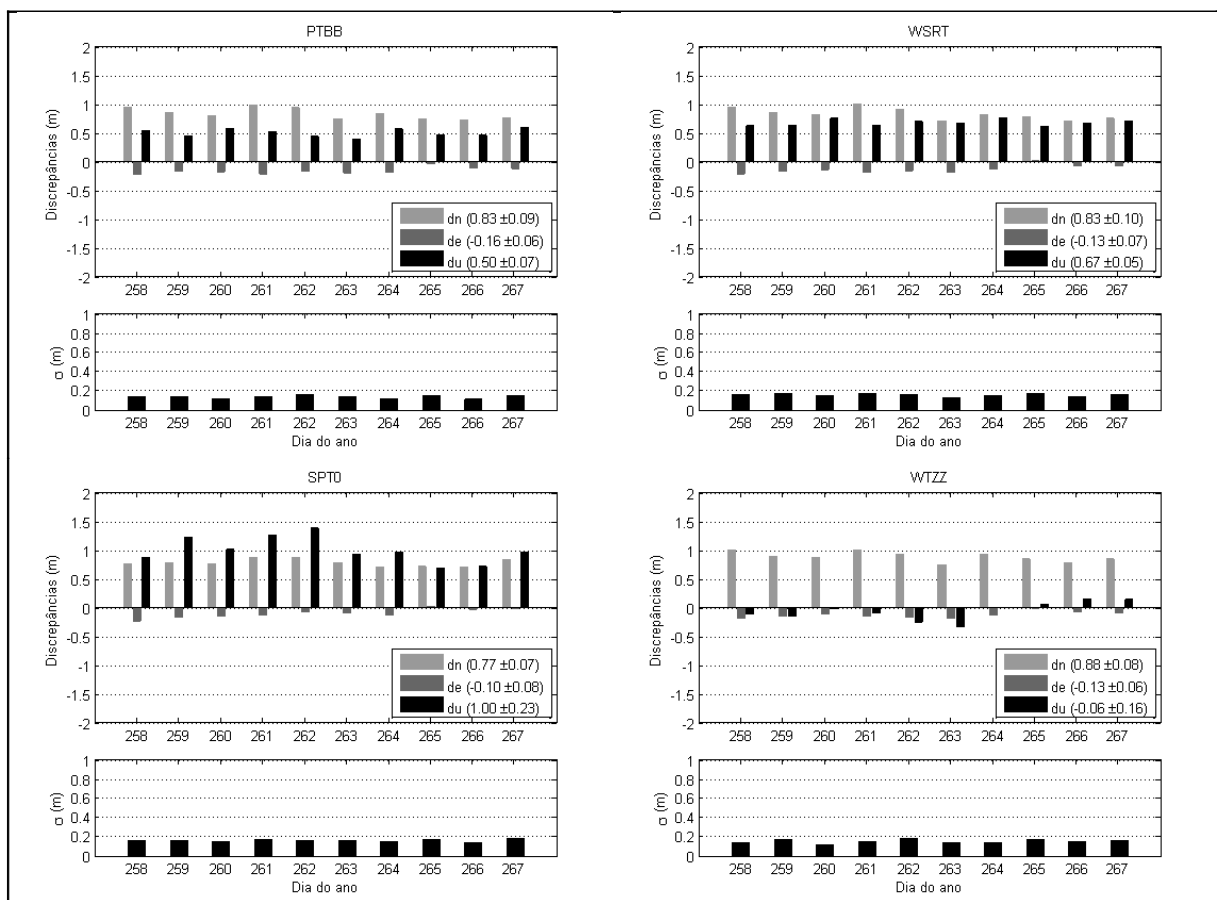


FIGURA 6.22 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P_1+RIM) – EUROPA

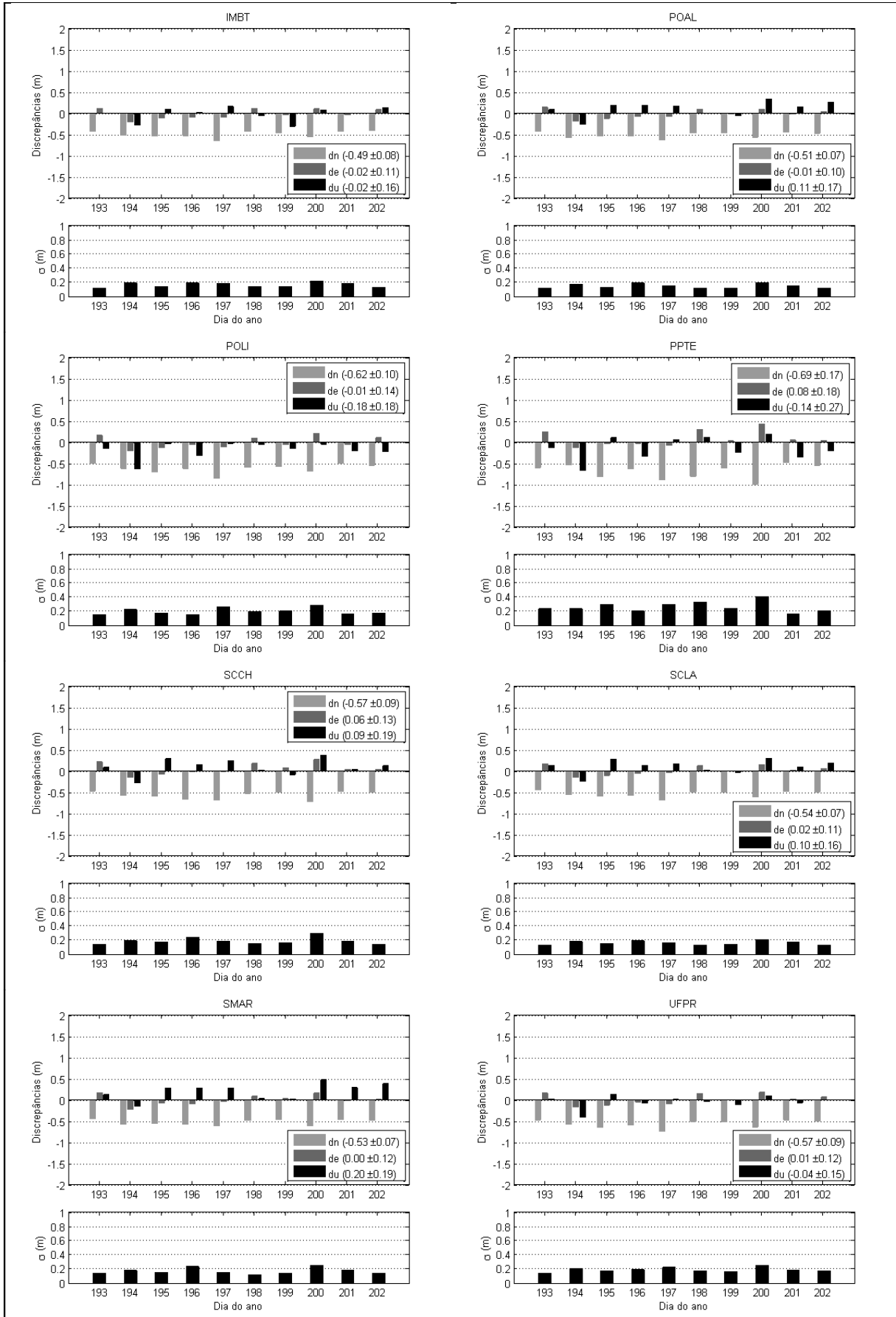


FIGURA 6.23 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (C/A+RIM) – BRASIL

As figuras 6.22 e 6.23 também mostram que as discrepâncias para a componente norte apresentaram valores superiores ao da componente altimétrica, como se observava na estação WTZZ, da ordem de 0,85 m, e para as estações brasileiras ficou em 0,55 m, em média. Isto mostra que os mapas de ionosfera gerados para as regiões de estudo não foram acurados o suficiente para corrigir os erros, chegando até a introduzir erros nos processamentos realizados neste estudo.

6.3 MODELAGEM IONOSFÉRICA LOCAL

Nesta seção serão discutidos alguns aspectos referentes à modelagem ionosférica local em rede proposta neste trabalho. Essa discussão gira em torno do número de satélites empregados na modelagem, das diferenças dos valores de VTEC observados e os interpolados e dos coeficientes de rede.

O programa desenvolvido é capaz de gerar uma série de arquivos tipo ASCII contendo informações necessárias para as análises, como: número de satélites empregados simultaneamente pelas estações, ângulo de elevação e azimute dos satélites, VTEC calculado para todas as estações de referência, o VTEC interpolado, e os coeficientes de rede. Após a apresentação desses resultados e discussões pertinentes à modelagem propriamente dita, serão mostrados os resultados no posicionamento PP.

6.3.1 Número de Satélites Observados Simultaneamente

Esta análise tem como objetivo verificar o número de satélites utilizados simultaneamente entre todas as estações da rede e uma estação teste.

A figura 6.24 mostra o número de satélites observados simultaneamente pela estação teste e as três estações de referência de cada uma das duas redes européias: EU-A (gráfico da esquerda) e EU-B (gráfico da direita), para o dia 258/2007. Os gráficos apresentados nesta figura são representativos para o que se obteve na maioria dos casos, onde o número de satélites observados variou de 4 a

8. Em outros casos, em apenas curtos períodos de tempo foram observados menos de 4 satélites.

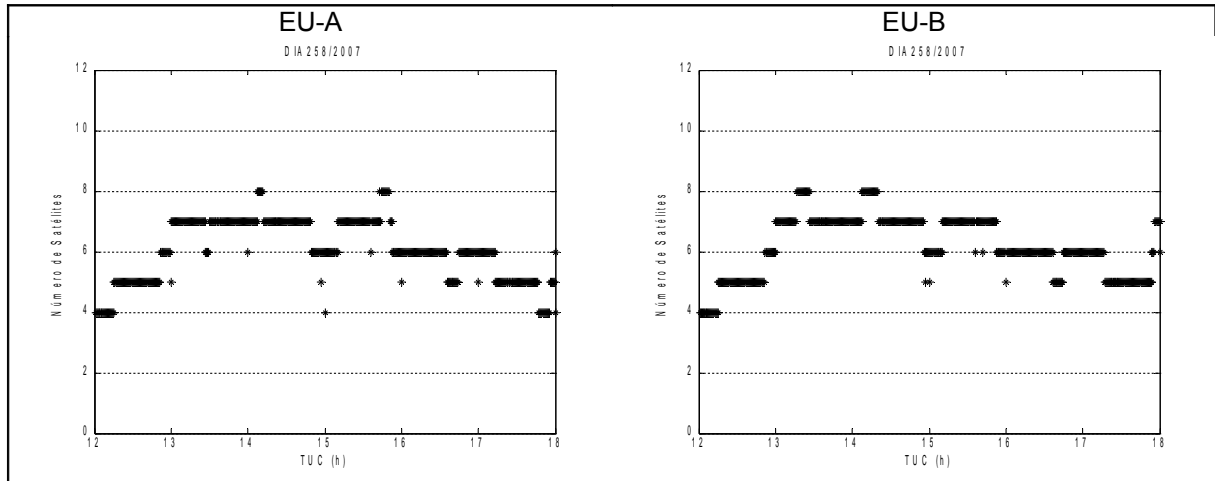


FIGURA 6.24 – SATÉLITES OBSERVADOS NAS REDES EUROPEÍAS (DIA 258/2007)

Constatou-se também que a rede EU-A apresentou ausência de observações nos dias 262, 263, 264 e 267 (2007). O problema foi causado pela estação de referência localizada mais ao norte, ONSA. A figura 6.25 ilustra essa situação (262 e 267/2007), onde se verifica a falta de observações no período entre 15:00h e 16:00h.

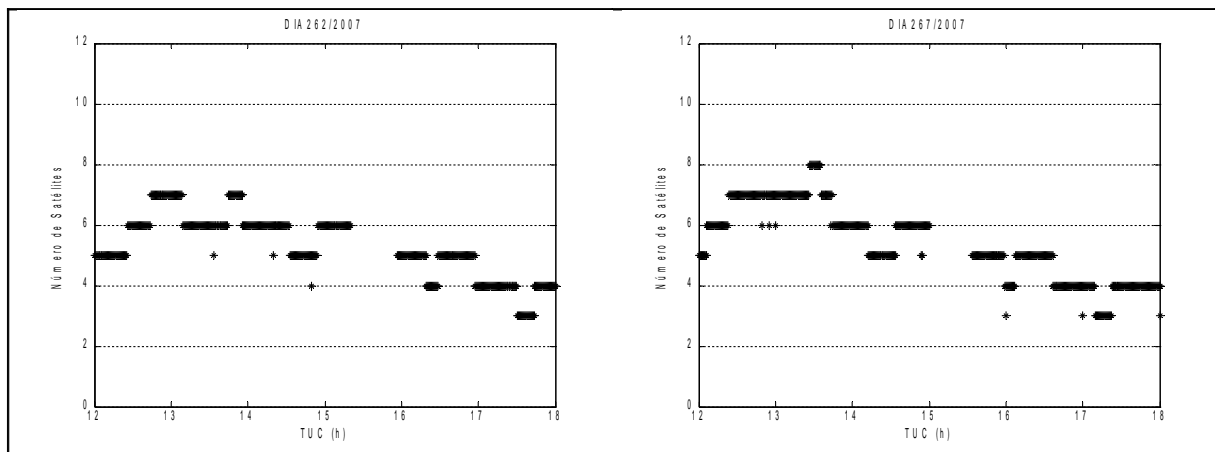


FIGURA 6.25 – SATÉLITES OBSERVADOS NA REDE EU-A (DIAS 262 E 267/2007)

A figura 6.26, mostra o número de satélites observados simultaneamente entre as estações teste e estações de referência para as redes BR-A, BR-B, BR-C e BR-D (194/2008). Estes gráficos são representativos para o que ocorreu na maioria dos dias. As três primeiras redes empregaram as estações SCCH e IMBT, onde o

número de satélites observados variou de 4 a 8. A última rede, que não utilizou nem a estação SCCH nem IMBT na sua formação, apresenta um número de satélites maior, entre 6 e 8.

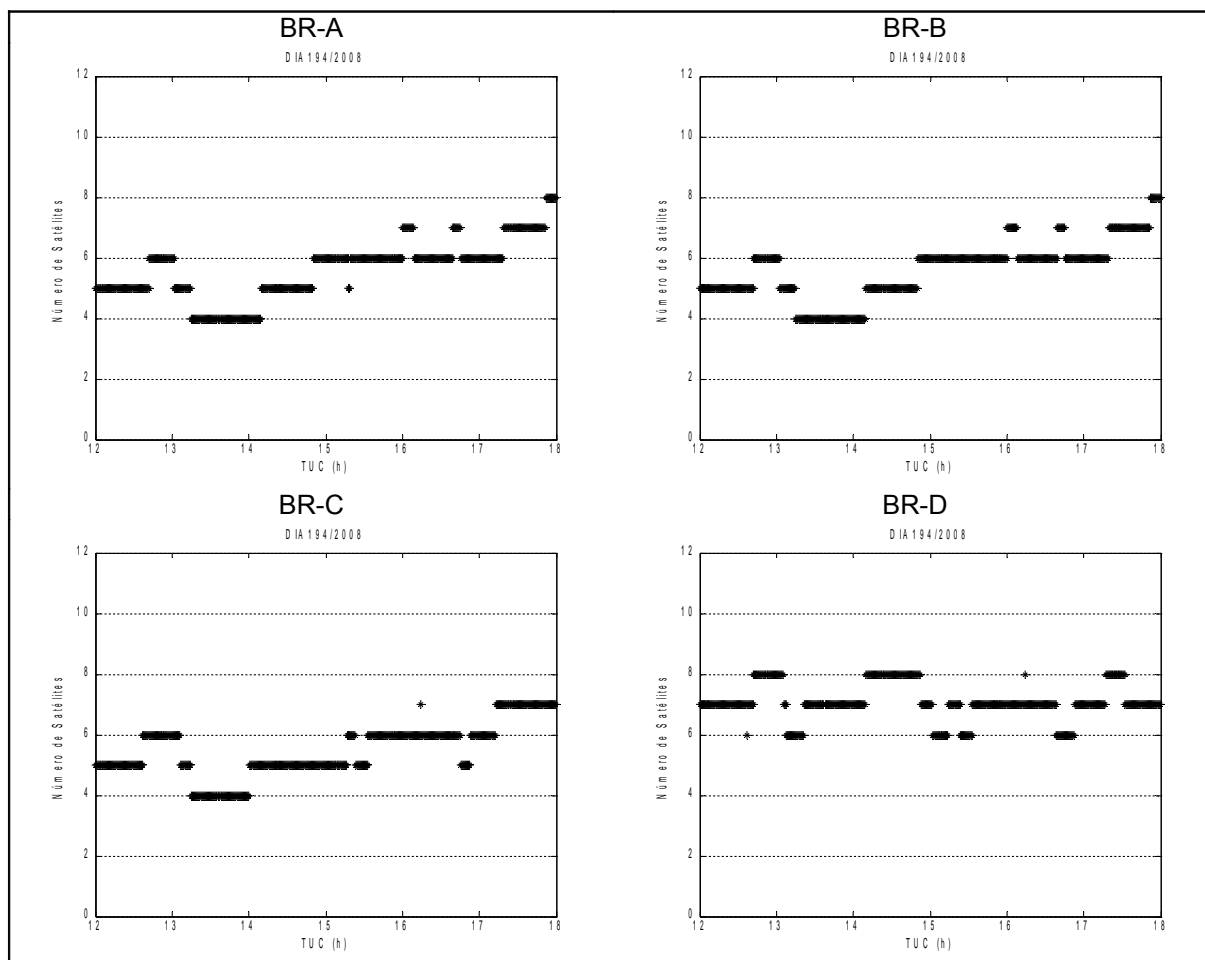


FIGURA 6.26 – SATÉLITES OBSERVADOS NAS REDES GPS BRASILEIRAS (DIA 194/2008)

Constata-se ausência de observações em alguns períodos nas estações BR-A, BR-B e BR-C para os dias 196 e 200/2008. A figura 6.27 mostra que no dia 196/2008 existe ausência de satélites em dois períodos; entre as 13:00h e 14:00h e entre as 15:00h e 16:00h, e no dia 200 entre as 12:00h e 13:30h, aproximadamente. Isto ocorreu em todas as redes que observaram as estações IMBT e SCCH. Essa ausência de satélites pode ser causada por dois motivos: o primeiro é a falta de observações em uma das estações da rede, e o segundo é devido à problemas na estimativa do VTEC em uma ou mais estações da rede, quando então o satélite é eliminado.

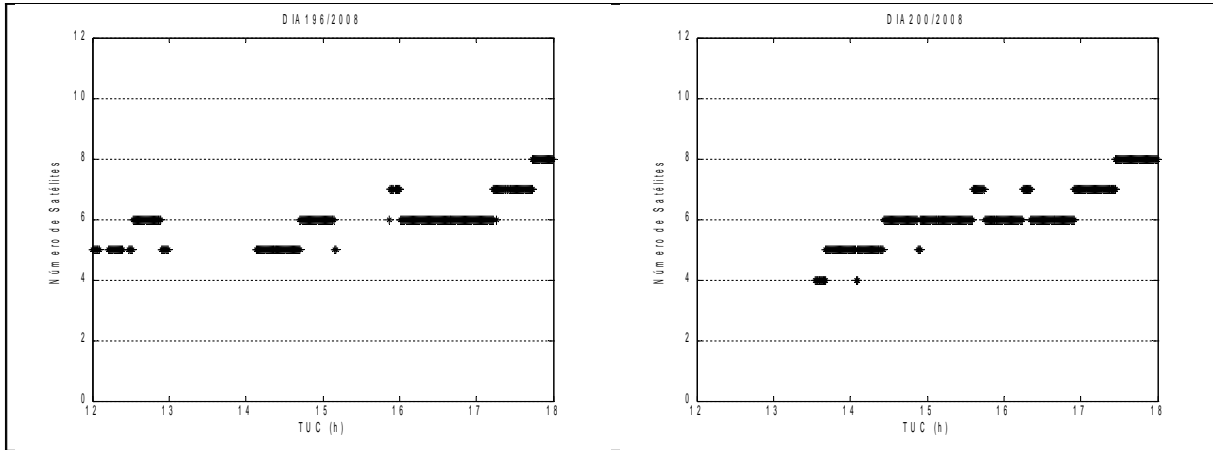


FIGURA 6.27 – SATÉLITES OBSERVADOS NA REDE BR-A (DIAS 196 E 200/2008)

6.3.2 TEC Observado Versus TEC Interpolado

Nesta seção são analisados os desvios-padrão (σ) e o erro relativo (ER) entre o VTEC observado, utilizando observações de dupla frequência da própria estação, e o VTEC interpolado, com informações da rede, segundo as equações 5.2 e 5.3.

As análises foram feitas sobre resultados de 11 satélites observados nos dias 258, 259 e 260/2007 pelas estações europeias. Para os demais dias houve problemas na geração dos arquivos NEPEX para alguns satélites, e para não comprometer os resultados, os dias 261 a 267/2007 não serão analisados no que se refere à modelagem implementada.

A tabela 6.1 mostra os desvios-padrão e o erro relativo para a estação PTBB, situada na rede EU-A. O maior desvio-padrão foi de 1,43 TECU para o satélite 9 no dia 260/2007. Quanto ao erro relativo, com exceção dos satélites PRN 31 (259/2007) e PRN 14 (260/2007) foi inferior a 10%. Nestes dois casos se constata que os desvios-padrão foram inferiores a 1 TECU. A figura 6.28 mostra, além do ângulo de elevação do satélite em relação à estação de referência (gráfico superior), valores de VTEC estimados na rede (gráfico intermediário) e os valores interpolados e observados (gráfico inferior) para os satélites que apresentaram o maior e menor erro relativo. A diferença entre o VTEC observado e o interpolado para o satélite PRN 30 (258/2007) foi inferior a 1%. Apesar do erro relativo para o

satélite PRN 31 (259/2007) ser de aproximadamente 10%, nota-se uma forte correlação entre os valores interpolados e observados.

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN										
		02	04	05	09	12	14	16	21	24	30	31
258	σ (TECU)	0,55	0,60	0,56	0,38	0,81	1,19	0,80	1,03	0,86	0,45	0,91
	ER (%)	0,89	1,19	0,75	1,56	4,40	6,95	7,44	4,49	6,09	0,83	6,89
259	σ (TECU)	0,70	0,25	1,04	1,24	0,97	0,50	0,74	0,72	0,72	0,79	0,76
	ER (%)	4,20	9,60	1,79	1,90	6,31	4,35	8,42	3,84	4,21	1,80	10,68
260	σ (TECU)	1,09	0,41	1,10	1,43	0,84	0,96	0,40	0,63	0,33	0,94	0,47
	ER (%)	1,65	3,73	3,65	2,33	4,35	10,32	3,43	1,41	6,43	1,98	7,46

TABELA 6.1 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO PTBB (REDE EU-A)

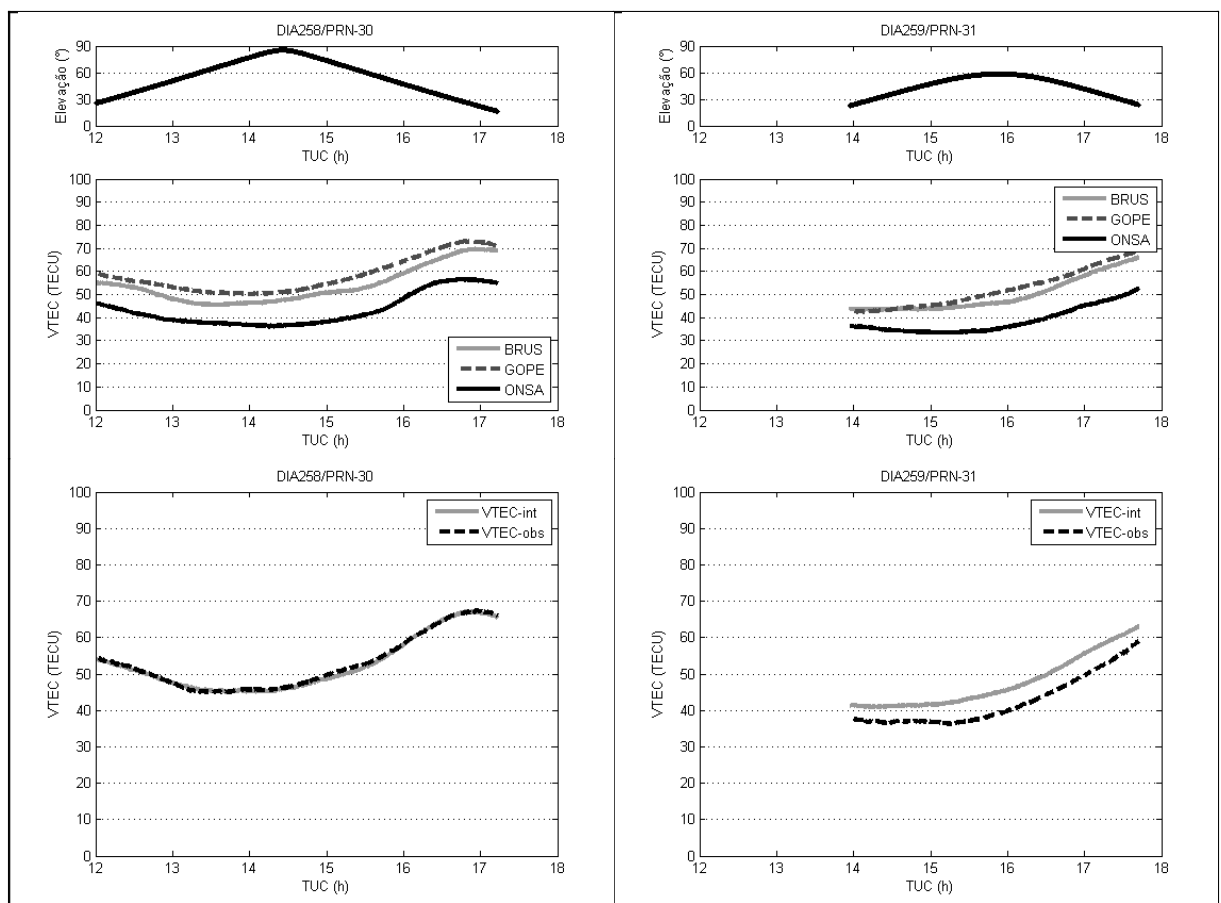


FIGURA 6.28 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO PTBB (REDE EU-A)

Observa-se na figura 6.28 (gráfico intermediário) que quanto mais próximo do equador uma estação se encontra, maiores são os valores de VTEC. Isto é esperado devido ao fato da região próxima ao equador geomagnético apresentar maior atividade ionosférica.

A tabela 6.2 mostra o desvio-padrão e o erro relativo obtidos para a estação WSRT, localizada na rede EU-A. Para todas as situações o desvio-padrão foi inferior a 2 TECU, sendo que o maior valor foi de 1,93 TECU para o satélite PRN 05

(258/2007). O erro relativo, com exceção dos satélites PRN 04, 05, 09 e 30, todos observados no dia 258/2007, um dia considerado de baixa atividade geomagnética segundo o índice Kp, foram inferiores a 10%. A figura 6.29 mostra valores de VTEC estimados nas estações da rede e os interpolados e observados para os satélites PRN 14 e PRN 05 (258/2007).

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN										
		02	04	05	09	12	14	16	21	24	30	31
258	σ (TECU)	0,68	0,48	1,93	1,51	0,68	0,53	0,40	0,45	0,54	1,75	0,98
	ER (%)	6,07	15,39	14,85	12,15	3,46	0,72	2,33	0,81	9,36	14,14	1,39
259	σ (TECU)	0,54	0,46	0,81	0,70	1,02	0,53	0,16	0,70	0,47	1,09	0,30
	ER (%)	0,81	7,43	9,53	6,35	2,43	1,00	1,96	6,24	5,31	7,72	1,31
260	σ (TECU)	0,71	0,43	0,80	1,68	0,67	1,22	0,48	1,33	0,69	0,74	0,70
	ER (%)	2,33	5,35	3,90	6,68	1,89	3,82	8,00	4,08	1,23	5,02	9,91

TABELA 6.2 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO WSRT (REDE EU-A)

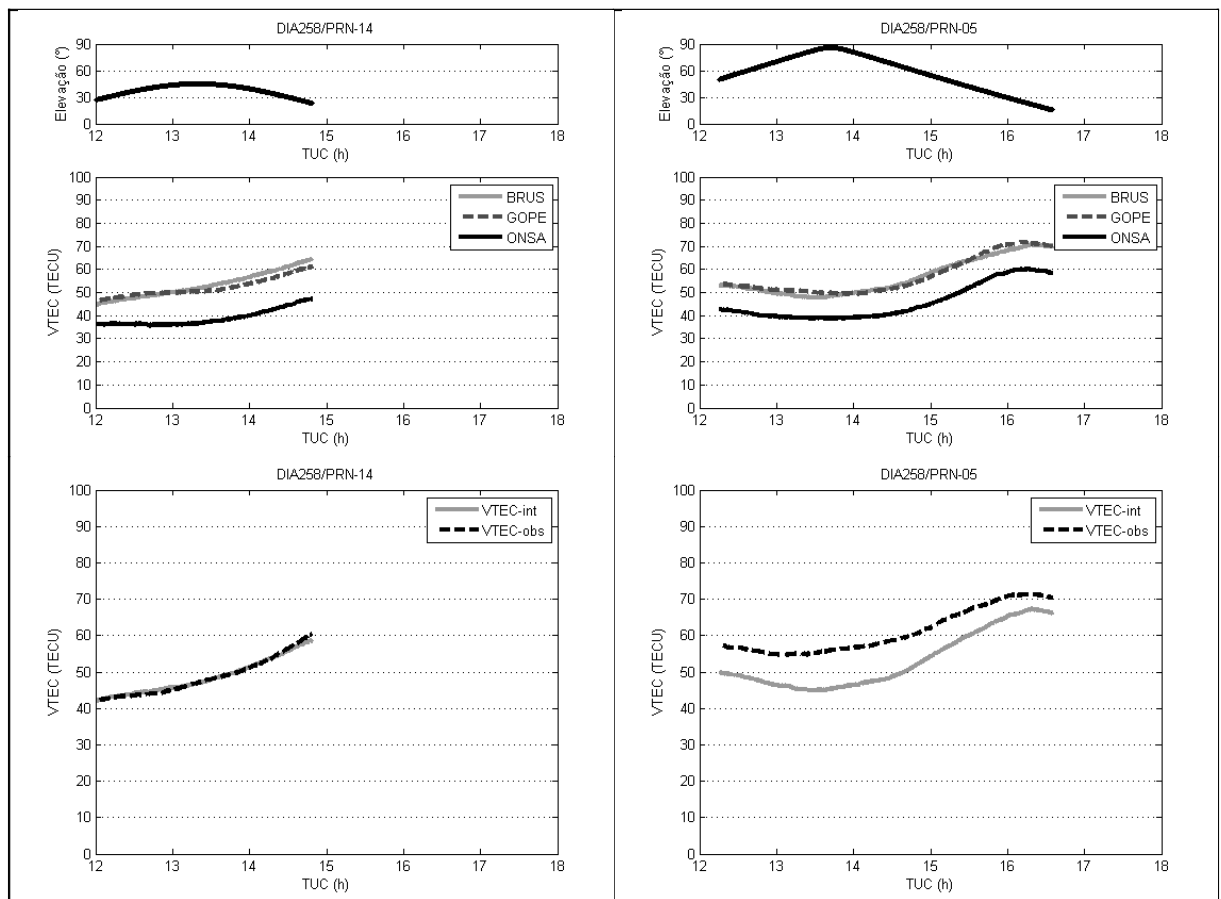


FIGURA 6.29 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO WSRT (REDE EU-A)

Apesar da estação SPT0 não estar localizada dentro da rede EU-A, foram extrapolados valores de VTEC para esta estação, localizada a 80 km da estação mais próxima, ONSA. A tabela 6.3 mostra que o maior desvio-padrão foi de

1,46 TECU para o satélite PRN 30 (259/2007). Em alguns casos, o erro relativo foi superior a 10%, porém não chegando a 15%. Estes valores indicam que a modelagem em rede também poderia ser utilizada para estações fora da rede, quando a extrapolação dos VTEC seria realizada. Não foram realizados mais estudos no sentido de verificar o quanto uma estação teste poderia se distanciar da rede para que se obtivesse resultados satisfatórios.

A figura 6.30 mostra os valores de VTEC na rede e os valores extrapolados e observados para a estação SPT0 para os satélites PRN 02 e 24 (258/2007).

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN										
		02	04	05	09	12	14	16	21	24	30	31
258	σ (TECU)	0,27	0,32	0,79	0,51	0,55	0,37	0,23	0,66	1,06	0,26	0,97
	ER (%)	0,48	6,47	5,87	1,45	3,56	4,11	3,18	4,68	14,26	0,81	9,15
259	σ (TECU)	0,37	0,32	0,41	0,52	0,65	0,68	0,29	0,37	0,30	1,46	0,87
	ER (%)	3,87	13,15	2,54	2,10	3,56	10,70	1,01	3,20	4,43	11,21	11,14
260	σ (TECU)	0,31	0,30	0,30	1,28	0,75	0,33	0,57	0,30	0,74	0,56	0,67
	ER (%)	4,42	3,45	2,17	6,27	9,30	2,36	10,48	1,68	10,56	3,14	5,78

TABELA 6.3 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO SPT0 (REDE EU-A)

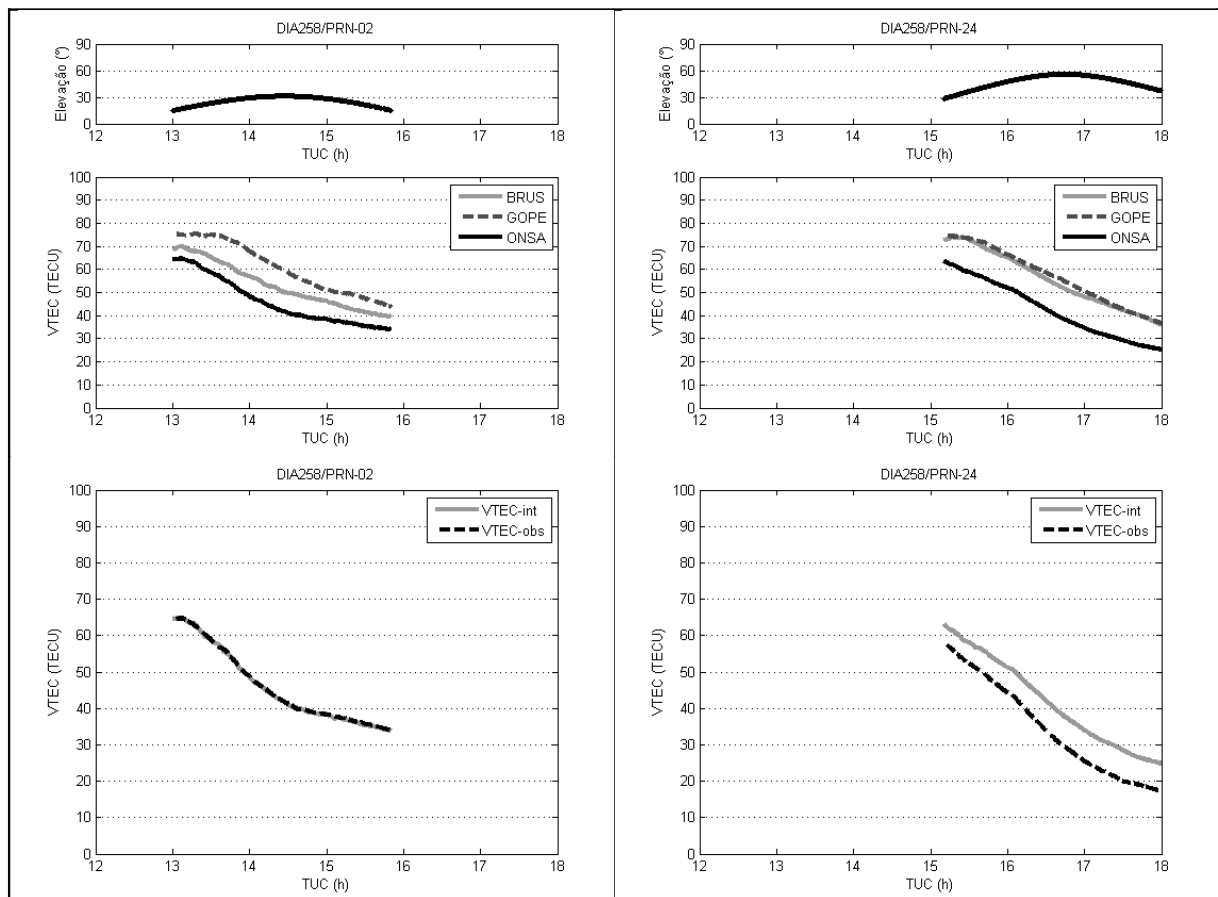


FIGURA 6.30 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO SPT0 (REDE EU-A)

Para a estação WTZZ, localizada na rede EU-B, o maior desvio-padrão foi de 1,83 TECU para o satélite PRN 05 (260/2007). O erro relativo máximo foi de 17,42, para este mesmo satélite no dia 259/2007. Na figura 6.31 é possível visualizar valores de VTEC para os satélites PRN 16 (258/2007) e PRN 05 (259/2007).

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN										
		02	04	05	09	12	14	16	21	24	30	31
258	σ (TECU)	0,49	0,41	1,59	0,74	0,92	0,92	0,24	0,29	0,31	0,69	*
	ER (%)	3,67	5,50	14,91	4,52	7,39	13,91	0,56	0,49	3,51	3,58	*
259	σ (TECU)	0,43	0,43	1,59	0,68	1,03	0,58	0,52	0,47	0,42	0,42	*
	ER (%)	1,59	4,18	17,42	5,04	7,56	1,49	2,69	2,37	3,30	1,50	*
260	σ (TECU)	0,86	0,58	1,83	0,52	1,25	1,80	0,34	0,81	0,46	0,91	*
	ER (%)	2,91	1,25	14,51	1,26	14,38	10,03	1,13	2,47	2,68	1,50	*

TABELA 6.4 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO WTZZ (REDE EU-B)

NOTA: * corresponde a satélites não observados no dia

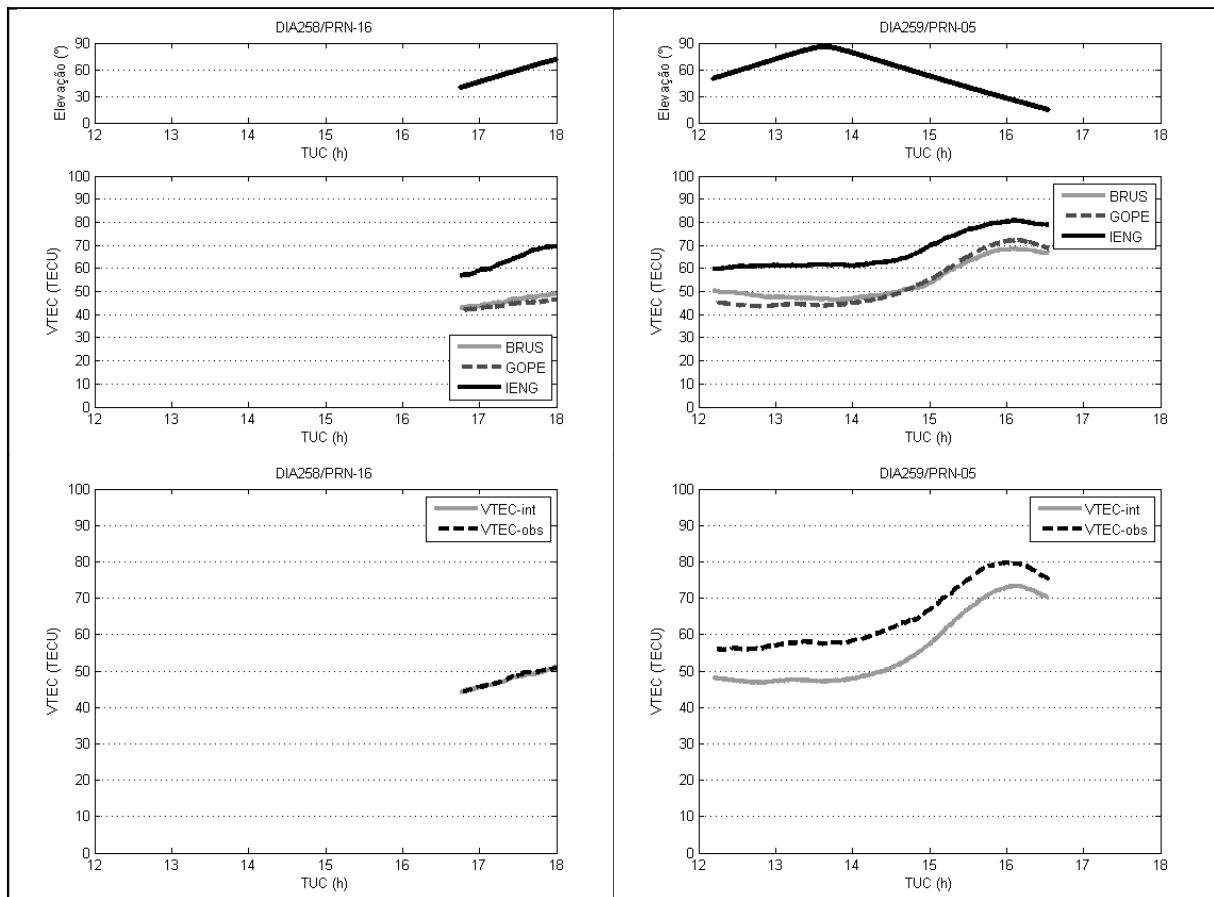


FIGURA 6.31 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO WTZZ (REDE EU-B)

As mesmas análises realizadas nas estações europeias também foram conduzidas nas estações brasileiras. Foram analisados 12 satélites para todos os 10 dias de dados. Algumas estações observaram mais de 12 satélites durante o

período das 12:00h às 18:00h (TUC), porém, para as análises foram escolhidos somente os satélites observados simultaneamente em 80% dos dias.

A tabela 6.5 mostra as estatísticas para a estação SCLA quando foi utilizada a rede BR-A. Os desvios-padrão foram maiores que os das estações européias, alcançando o valor máximo de 2,94 TECU (PRN 03, 198/2008).

Os erros relativos, por sua vez, foram significativamente maiores do que aqueles calculados para as estações européias. A média do erro relativo ficou em torno de 13%, porém, observam-se valores superiores a esse. O maior erro foi obtido para o satélite PRN 02 no último dia de rastreamento (202/2008), alcançando 68,15%. O erro, nesse caso chegou a ser de 17 TECU (2,7 m). Em outras onze situações os erros foram superiores a 20%, para os satélites PRN 02, 03, 05 e 09 nos dias 196, 198, 199, 201 e 202/2008.

Um dos motivos que contribuiu para que o erro relativo fosse maior para as estações brasileiras, é devido à forma com que os DCB foram estimados. Os DCB utilizados nas estações da Europa foram estimados pelo CODE, e são o resultado de uma média de três dias, resultando em desvios-padrão da ordem de 0,02 TECU. Os DCB utilizados pelas estações brasileiras, no entanto, foram estimados pelo Bernese no processo de geração de mapas regionais de ionosfera com desvios-padrão da ordem de 0,45 TECU.

O fato das estações brasileiras empregarem o código C/A ao invés do código P₁, e o programa de modelagem não levar em consideração o DCB entre estas duas observáveis (P₁-C₁), implica em inconsistências que também contribuíram para que o erro fosse maior. Além disso, também era de se esperar erros maiores para a modelagem no Brasil devido ao fato da região de estudo se encontrar em uma área de maior atividade ionosférica.

Apesar dos erros serem maiores, observa-se que existe uma forte correlação entre os valores interpolados e observados. Isto é um indicativo que os problemas podem ser de natureza sistemática, os quais não foram devidamente levados em consideração em função dos problemas mencionados anteriormente.

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN											
		02	03	05	06	09	14	16	18	21	22	24	30
193	σ (TECU)	0,93	0,43	0,70	0,66	0,68	0,62	0,99	1,38	0,94	1,62	0,80	0,77
	ER (%)	16,60	7,77	22,93	7,31	11,54	1,04	9,54	17,77	13,44	9,23	13,76	7,73
194	σ (TECU)	0,73	1,18	1,30	1,15	0,75	0,49	0,86	1,40	1,10	1,57	0,51	0,83
	ER (%)	10,11	8,19	17,10	11,07	5,38	0,88	6,17	12,36	11,28	6,65	3,83	3,59
195	σ (TECU)	1,11	0,51	0,84	1,28	0,96	0,52	0,63	1,05	0,85	0,73	0,63	1,32
	ER (%)	12,92	9,85	10,52	14,63	9,72	0,81	7,70	13,34	17,73	7,36	7,76	8,30
196	σ (TECU)	0,68	0,34	1,57	0,84	0,99	0,61	0,58	2,03	1,61	0,69	0,94	1,31
	ER (%)	4,15	7,19	47,41	13,40	15,63	3,59	5,43	17,53	12,70	7,74	9,32	5,69
197	σ (TECU)	0,69	0,77	0,61	1,30	1,22	0,81	0,63	0,88	0,93	1,05	0,90	1,13
	ER (%)	14,79	15,89	3,65	14,83	20,44	5,90	6,36	10,19	14,30	11,48	13,15	5,96
198	σ (TECU)	0,94	2,94	1,03	1,81	1,17	1,02	0,83	1,16	0,65	1,58	0,64	1,24
	ER (%)	26,69	47,47	30,80	15,75	27,32	3,00	3,07	14,26	8,43	8,80	15,00	9,54
199	σ (TECU)	0,98	1,32	1,18	0,81	0,72	0,75	0,31	1,20	0,69	0,38	0,96	1,06
	ER (%)	26,32	19,77	32,93	7,60	22,53	5,25	1,95	14,73	8,40	0,60	17,76	9,31
200	σ (TECU)	*	0,65	0,94	0,81	*	1,25	1,31	1,88	1,43	0,99	0,81	2,22
	ER (%)		11,04	7,50	5,44		1,50	2,61	11,24	11,63	2,52	5,98	10,85
201	σ (TECU)	0,59	0,81	1,65	1,03	0,64	1,26	0,51	1,12	1,04	1,34	0,71	1,29
	ER (%)	13,76	7,62	37,99	8,94	24,67	10,96	4,12	14,34	15,08	9,81	14,90	8,49
202	σ (TECU)	1,53	0,55	0,95	0,70	0,71	0,98	0,58	1,59	0,63	1,64	0,96	0,90
	ER (%)	68,15	8,86	27,23	3,40	33,53	5,04	1,77	15,55	10,43	9,01	19,12	7,05

TABELA 6.5 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-A)

NOTA: * corresponde a satélites não observados no dia

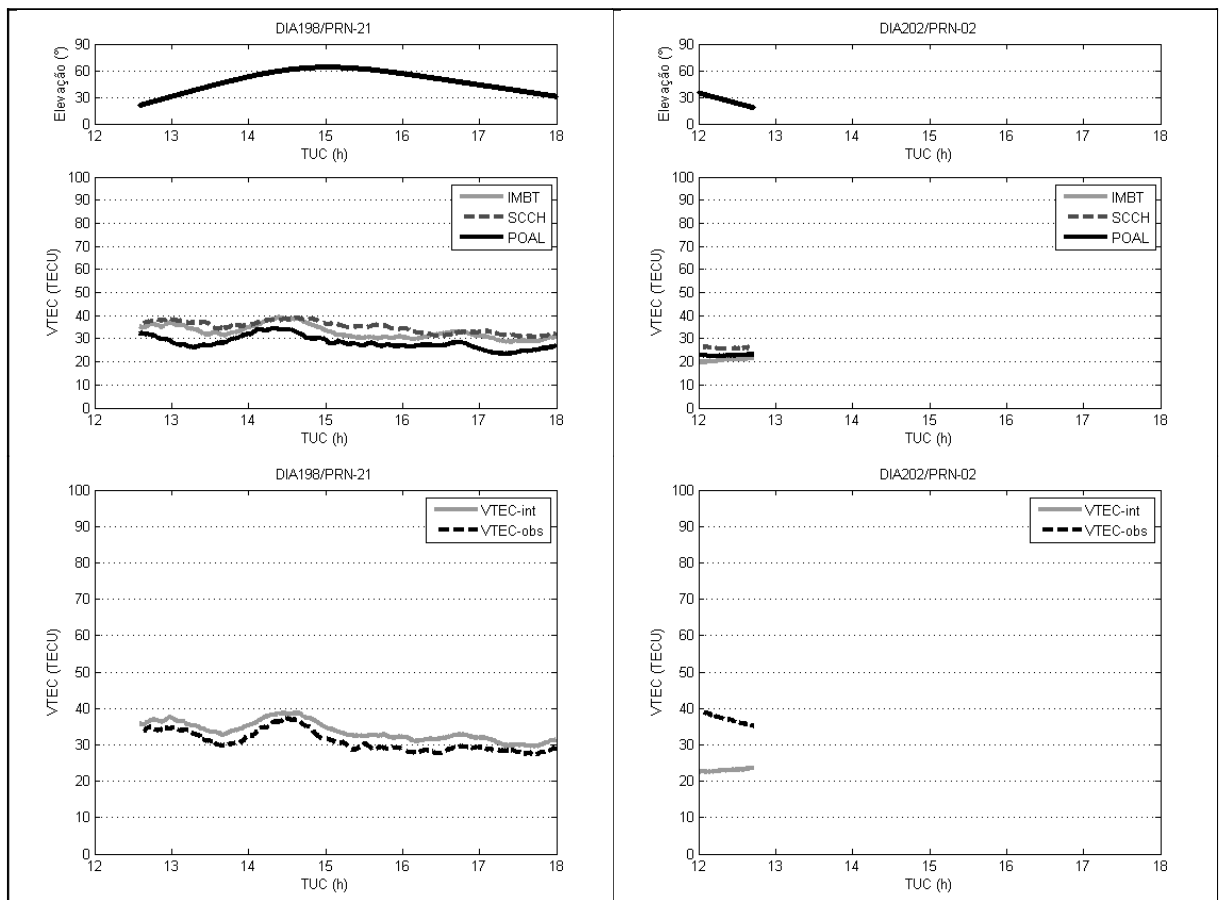


FIGURA 6.32 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-A)

Para a estação SCLA, é possível visualizar à esquerda da figura 6.32 os valores de VTEC calculados para o satélite PRN 21 (198/2008) e à direita para o satélite PRN 02 (202/2008), justamente quando o maior erro relativo foi obtido (68,15%). Neste caso, verifica-se na figura que no início do rastreamento o ângulo de elevação do satélite era de 30°, que em menos de 1 hora chegou a 15°, quando a partir de então o satélite deixou de fazer parte do processamento. O ângulo de elevação baixo e um número reduzido de observações foram os principais motivos para que o erro relativo fosse dessa magnitude.

Os resultados obtidos para a estação SCLA, mas desta vez empregando a rede BR-B, podem ser visualizados na tabela 6.6. Observa-se uma forte correlação dos resultados obtidos na rede anterior com esta, devido ao fato das duas redes empregarem duas estações de referência em comum (IMBT e SCCH). A terceira estação era diferente em cada caso, POAL para a rede BR-A e SMAR para BR-B, mas estas duas estações se encontram em latitudes não muito diferentes (menos de 1 grau), o que contribuiu para que os erros fossem parecidos.

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN											
		02	03	05	06	09	14	16	18	21	22	24	30
193	σ (TECU)	0,94	0,43	0,69	0,65	0,69	0,62	1,00	1,38	0,94	1,64	0,80	0,77
	ER (%)	16,67	7,72	23,10	7,26	11,30	1,04	9,54	17,76	13,43	9,15	13,69	7,74
194	σ (TECU)	0,75	1,17	1,28	1,14	0,76	0,49	0,85	1,39	1,10	1,60	0,51	0,80
	ER (%)	10,16	8,20	17,15	11,05	5,22	0,86	6,17	12,37	11,28	6,58	3,77	3,60
195	σ (TECU)	1,12	0,52	0,83	1,28	0,99	0,52	0,63	1,04	0,85	0,74	0,62	1,31
	ER (%)	12,97	9,89	10,57	14,60	9,51	0,84	7,72	13,34	17,70	7,26	7,68	8,33
196	σ (TECU)	0,68	0,34	1,55	0,84	0,99	0,61	0,58	2,02	1,60	0,70	0,94	1,30
	ER (%)	4,18	7,20	47,78	13,40	15,56	3,59	5,41	17,54	12,67	7,66	9,30	5,71
197	σ (TECU)	0,70	0,77	0,61	1,30	1,23	0,81	0,63	0,89	0,93	1,06	0,89	1,12
	ER (%)	14,85	15,94	3,67	14,80	20,29	5,93	6,33	10,17	14,27	11,36	13,06	5,96
198	σ (TECU)	0,96	2,94	1,01	1,80	1,20	1,00	0,83	1,16	0,65	1,59	0,65	1,25
	ER (%)	26,77	47,50	30,85	15,69	26,96	2,96	3,06	14,25	8,40	8,68	15,09	9,53
199	σ (TECU)	1,00	1,33	1,17	0,81	0,73	0,75	0,31	1,20	0,69	0,38	0,95	1,05
	ER (%)	26,36	19,83	33,10	7,63	22,28	5,22	1,95	14,69	8,35	0,62	17,69	9,31
200	σ (TECU)	*	0,65	0,95	0,80	*	1,26	1,31	1,88	1,42	1,00	0,80	2,23
	ER (%)		11,06	7,63	5,39		1,51	2,61	11,24	11,61	2,44	5,92	10,90
201	σ (TECU)	0,60	0,81	1,64	1,03	0,66	1,27	0,50	1,12	1,04	1,36	0,70	1,29
	ER (%)	13,80	7,58	38,09	8,89	24,31	11,01	4,13	14,36	15,06	9,73	14,87	8,54
202	σ (TECU)	1,54	0,55	0,93	0,70	0,73	0,97	0,58	1,60	0,63	1,65	0,97	0,90
	ER (%)	68,18	8,81	27,53	3,46	33,24	5,12	1,78	15,60	10,43	8,92	19,20	7,09

TABELA 6.6 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-B)

NOTA: * corresponde a satélites não observados no dia

A figura 6.33 mostra os VTEC estimados para os satélites PRN 16 e 24 (193/2008), quando os erros relativos foram da ordem de 10 e 14%, respectivamente.

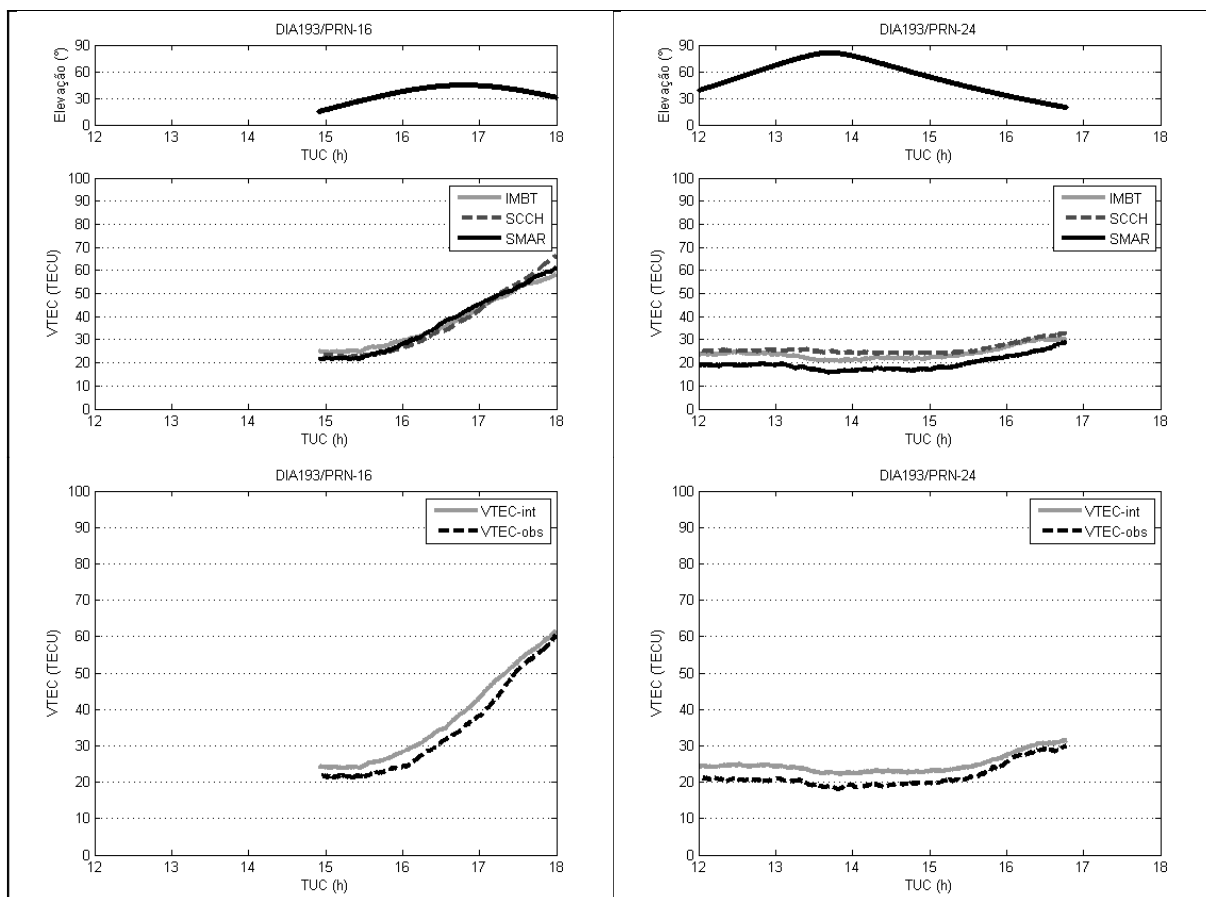


FIGURA 6.33 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO SCLA (REDE BR-B)

A estação teste UFPR, localizada na rede BR-C (IMBT, SCCH, PPTE) foi analisada e os resultados são mostrados na tabela 6.7. O satélite PRN 21 (202/2008) apresentou desvio-padrão superior ao obtido para os demais satélites, ou mesmo para este mesmo satélite em outros dias, alcançando um valor de 7,24 TECU. Constatou-se que isto aconteceu devido a problemas na estimativa do VTEC para a estação POLI para este satélite neste dia. Com exceção deste satélite, o maior desvio-padrão foi de 3,13 TECU para o satélite PRN 06 (201/2008). Os demais satélites apresentaram desvios-padrão com valores inferiores a 3 TECU.

O erro relativo máximo foi de 41,3%, para o satélite PRN 05 no dia 196. Erros da ordem de 20 a 30% também são observados em algumas situações, mas de forma geral o erro foi inferior a 12%.

A figura 6.34 mostra os valores de VTEC para os satélites PRN 21 e PRN 05 (198/2008), quando os erros relativos foram de 3,5% e 30,5%, respectivamente.

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN											
		02	03	05	06	09	14	16	18	21	22	24	30
193	σ (TECU)	0,22	0,55	1,21	0,66	0,55	0,65	0,75	1,34	0,66	1,48	0,96	*
	ER (%)	3,85	8,52	26,46	8,35	2,82	4,81	12,88	10,37	1,47	2,43	7,71	
194	σ (TECU)	0,40	1,85	1,65	2,21	0,47	1,21	1,16	1,44	0,74	1,20	1,04	1,08
	ER (%)	0,90	8,69	18,14	12,60	6,20	6,08	13,35	6,47	1,06	3,31	11,66	4,75
195	σ (TECU)	0,34	0,67	1,54	0,85	0,39	1,84	0,81	1,41	1,05	1,30	1,47	0,95
	ER (%)	6,63	19,22	17,06	14,29	2,18	5,05	22,41	12,42	6,85	7,44	19,68	5,70
196	σ (TECU)	0,55	1,07	1,36	1,60	0,34	0,60	1,82	1,26	0,87	0,96	1,01	0,99
	ER (%)	4,82	18,50	41,26	14,35	6,04	5,71	12,50	8,58	6,18	2,64	16,59	5,83
197	σ (TECU)	0,60	0,78	0,78	1,18	0,19	1,67	0,99	1,81	1,22	1,44	1,34	1,31
	ER (%)	2,14	27,20	18,31	24,58	2,13	8,24	20,85	8,69	3,14	6,53	13,69	4,85
198	σ (TECU)	0,29	1,40	1,15	1,93	0,72	1,09	1,54	1,60	1,25	1,16	0,99	1,91
	ER (%)	7,69	21,15	30,47	22,47	5,95	8,85	14,92	15,39	3,51	4,11	20,58	7,07
199	σ (TECU)	0,15	0,81	0,56	1,24	0,42	0,97	0,66	1,45	0,54	1,05	0,92	0,77
	ER (%)	0,46	14,66	9,97	18,49	3,46	3,86	11,39	7,55	3,35	2,56	13,56	3,12
200	σ (TECU)	*	2,57	1,04	2,51	*	1,45	1,68	2,04	2,22	1,76	1,11	1,23
	ER (%)		19,52	13,75	14,54		1,73	13,15	9,54	8,49	6,60	14,88	7,92
201	σ (TECU)	0,18	0,96	0,66	3,13	0,29	1,40	1,57	0,87	0,93	1,29	1,26	0,82
	ER (%)	4,26	18,91	29,49	23,48	1,55	8,80	15,92	9,78	7,96	8,18	24,71	7,73
202	σ (TECU)	0,25	0,89	0,97	1,45	0,50	1,04	2,04	1,66	7,24	0,98	1,53	0,87
	ER (%)	14,30	14,24	18,87	18,02	10,74	6,95	14,25	16,60	16,66	3,95	20,37	8,24

TABELA 6.7 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-C)

NOTA: * corresponde a satélites não observados no dia

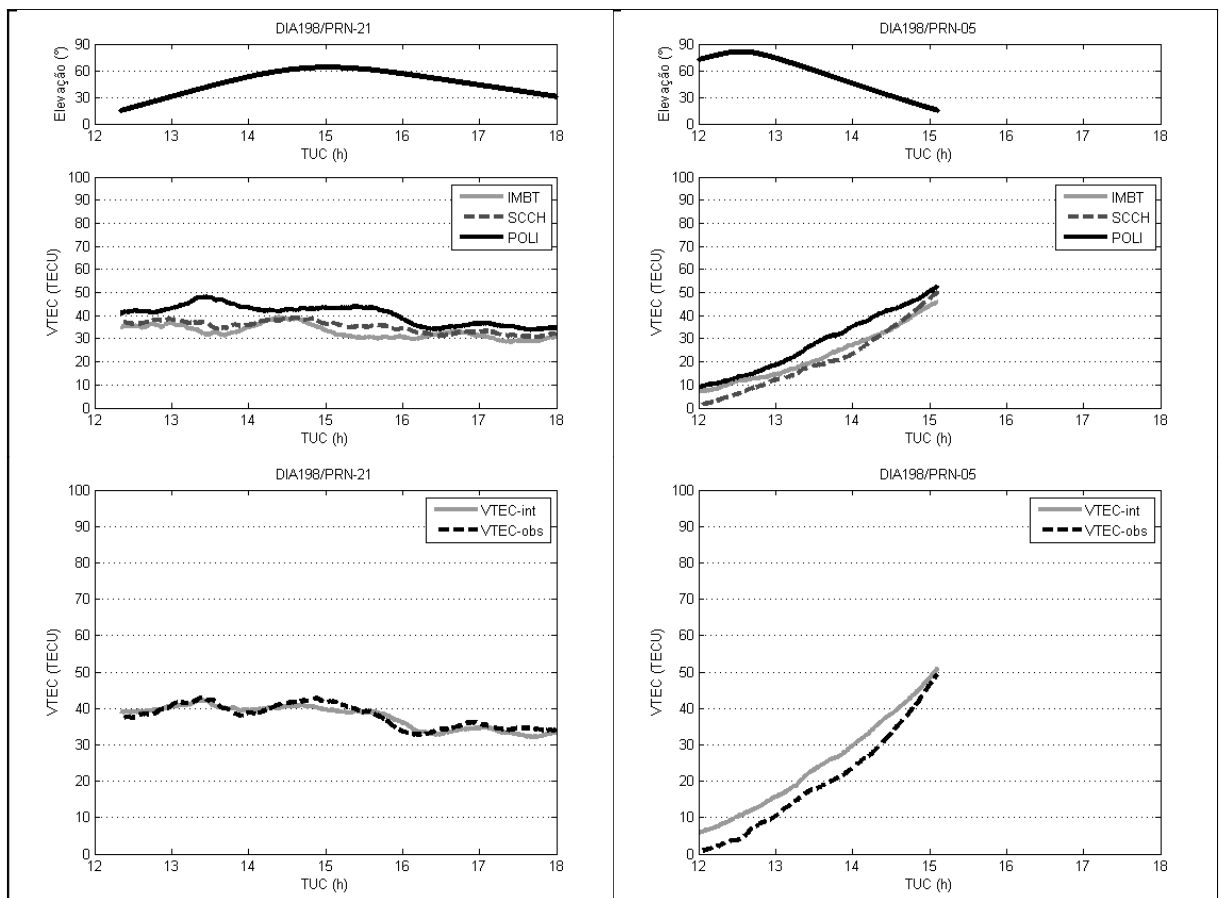


FIGURA 6.34 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-C)

Os resultados para a estação UFPR, quando a rede BR-D (POLI, PPTE e SCLA) foi utilizada, são apresentados na tabela 6.8. Da mesma forma que na rede

anterior, o satélite PRN 21 (202/2008) apresentou desvio-padrão maior do que dos demais dias, onde novamente se constatou que a estação POLI apresentou valores de VTEC discrepantes dos valores estimados pelas outras estações da rede.

Nota-se na tabela 6.8 que o erro relativo para esta estação foi inferior ao das demais estações brasileiras estudadas. O maior erro relativo foi de 23,07% para o satélite PRN 03 (198/2008). Em poucos casos os erros foram superiores a 20%.

DIA	VTEC _{INT-OBS}	PRN											
		02	03	05	06	09	14	16	18	21	22	24	30
193	σ (TECU)	0,38	0,47	0,75	0,71	0,78	0,78	0,64	0,79	0,76	0,95	0,58	*
	ER (%)	10,58	6,10	11,90	6,20	8,42	1,41	6,93	2,18	7,59	2,55	1,88	
194	σ (TECU)	0,25	1,07	1,29	1,93	1,13	1,55	1,07	1,13	1,01	1,35	0,86	0,93
	ER (%)	2,88	9,79	10,33	14,14	11,58	4,90	8,50	1,15	6,55	1,22	6,50	2,86
195	σ (TECU)	0,80	0,69	1,25	1,31	0,88	1,62	0,84	0,94	0,99	1,15	0,93	0,74
	ER (%)	11,05	14,51	11,84	11,01	4,00	5,05	12,54	3,21	2,47	2,29	7,25	1,74
196	σ (TECU)	0,61	1,65	1,09	2,27	0,92	0,66	1,48	0,81	0,75	1,46	0,95	0,54
	ER (%)	9,52	11,96	18,71	9,52	12,67	0,98	6,95	1,36	2,04	1,68	7,02	3,32
197	σ (TECU)	0,39	1,12	0,69	1,66	0,76	1,45	0,90	1,17	1,04	1,26	1,07	0,87
	ER (%)	3,98	20,52	19,14	17,91	10,56	3,99	12,51	2,17	4,52	1,64	3,34	2,52
198	σ (TECU)	0,55	1,93	1,00	1,87	0,59	2,21	1,23	1,52	1,27	1,61	1,12	1,32
	ER (%)	14,75	23,07	15,13	15,52	9,44	4,16	10,35	3,37	7,81	2,01	11,40	1,66
199	σ (TECU)	0,45	1,10	0,32	1,14	0,69	0,83	0,62	0,79	0,69	1,03	0,47	0,91
	ER (%)	13,14	14,11	1,72	11,46	9,10	1,13	8,75	1,55	2,58	2,35	1,36	1,26
200	σ (TECU)	0,17	2,26	0,94	1,91	0,68	1,48	0,89	1,95	3,26	2,25	0,98	1,67
	ER (%)	15,59	12,80	22,21	8,60	11,94	1,73	11,96	3,65	3,98	5,34	7,63	4,79
201	σ (TECU)	0,28	1,39	0,43	3,02	0,54	0,61	1,47	0,77	0,71	1,08	0,76	0,55
	ER (%)	2,93	12,81	13,00	15,15	15,74	0,64	12,12	1,30	2,36	2,89	7,25	3,12
202	σ (TECU)	0,41	1,03	0,71	1,21	0,36	0,57	1,47	1,07	5,19	1,42	1,54	0,76
	ER (%)	11,77	8,85	9,42	8,71	10,75	1,12	8,98	3,52	14,33	2,13	11,54	3,59

TABELA 6.8 – ERRO NA MODELAGEM IONOSFÉRICA – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-D)

A figura 6.35 mostra os VTEC estimados para a estação UFPR na modelagem da rede BR-D para os satélites PRN 18 e 30 (198/2008), quando o erro relativo não ultrapassou 5% em nenhum dos casos. Verifica que para o satélite PRN 30, no final do rastreamento, quando o ângulo de elevação é inferior a 30° o VTEC da estação PPTTE (mais ao norte) apresenta valores que atingem 100 TECU. Neste caso, o erro devido à refração ionosférica foi de aproximadamente 16,2 m, sendo que em média 99,3% desse erro foi estimado pelas estações da rede.

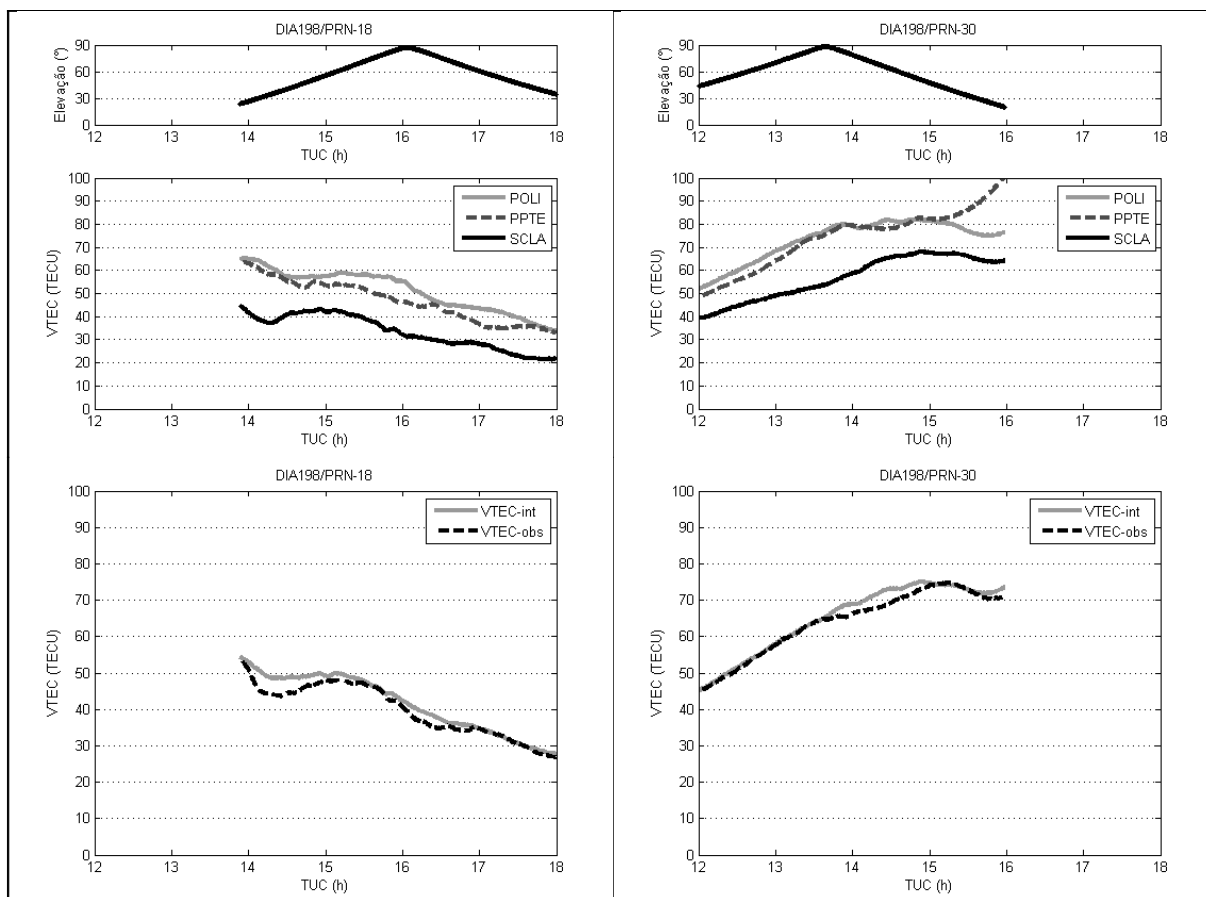


FIGURA 6.35 – VTEC OBSERVADO E INTERPOLADO – ESTAÇÃO UFPR (REDE BR-D)

6.3.3 Análise dos Coeficientes de Rede

Os coeficientes de rede na direção da latitude e longitude são estimados para cada satélite em cada época de observação. Eles representam a declividade dos planos segundo o meridiano e paralelo.

A figura 6.36 é uma representação geométrica da superfície linear que descreve o erro ionosférico obtido para cada um dos 6 satélites rastreados pelas estações da rede BR-A. A modelagem emprega as coordenadas (latitude e longitude) do ponto ionosférico (IPP) na camada ionosférica, representados por triângulos na figura, e como o cálculo dos IPP leva em consideração, dentre outros parâmetros, o azimute dos satélites, observam-se diferentes coordenadas para cada satélite.

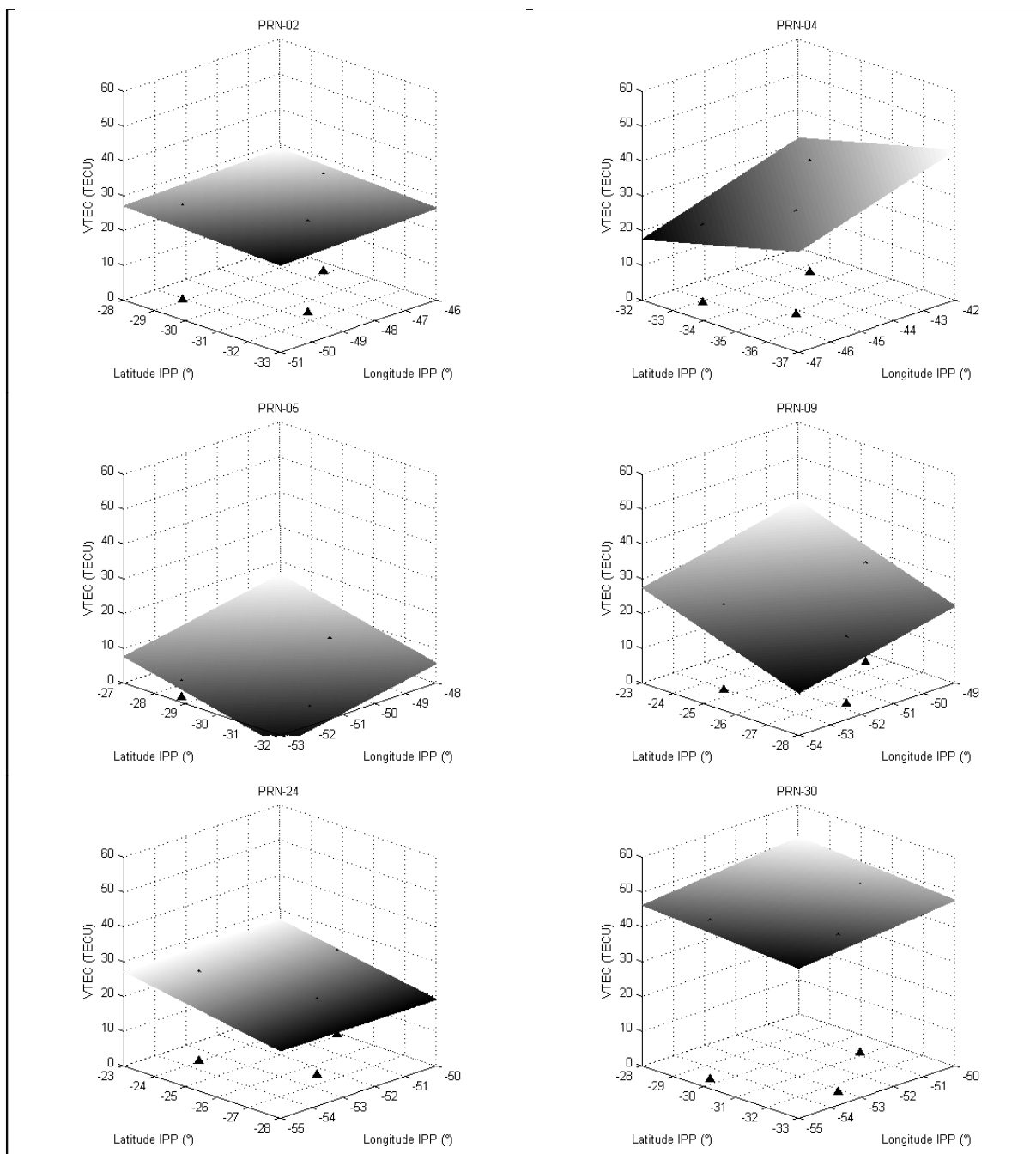


FIGURA 6.36 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA SUPERFÍCIE LINEAR

NOTA: Rede BR-A, dia 193/2008, 12:00h

As figuras 6.37 e 6.38 mostram a variação temporal dos coeficientes de rede estimados. O número de satélites é apresentado no gráfico superior, os valores de VTEC calculados em cada estação da rede são mostrados no gráfico intermediário, e os coeficientes de rede no inferior. Os coeficientes foram transformados para ppm (partes por milhão). Isto significa que o afastamento de 1.000 m de uma estação causa uma variação de 1 mm no VTEC, o que equivale a uma variação de aproximadamente 0,7 TECU°.

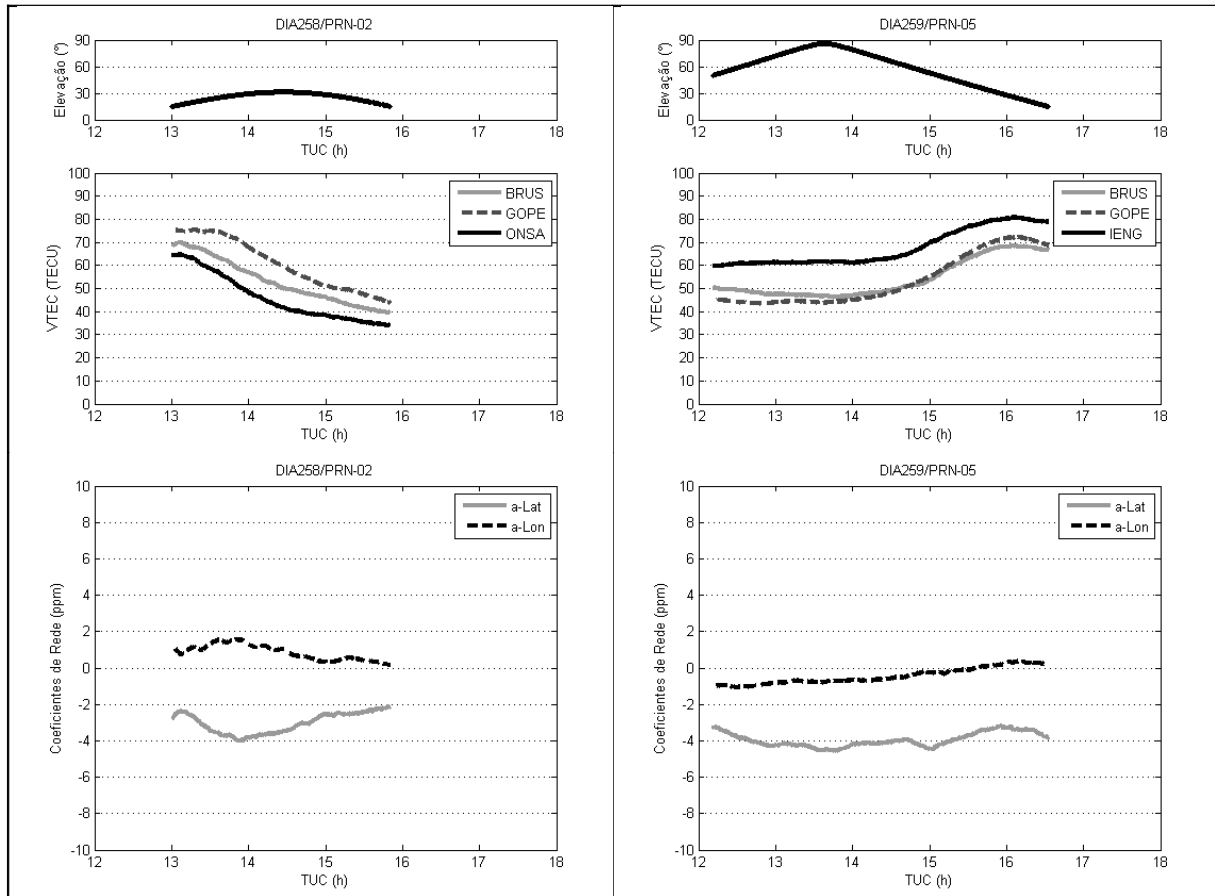


FIGURA 6.37 – VARIAÇÃO TEMPORAL DOS COEFICIENTES DE REDE (REDE EU-A E EU-B)

À esquerda da figura 6.37 se observa a variação temporal dos coeficientes de rede para o satélite PRN 02 (258/2007), na rede EU-A. Os coeficientes em longitude apresentam valores inferiores a 2 ppm, e em latitude entre 2 e 4 ppm. Para o satélite PRN 05 (259/2007), nota-se um comportamento mais regular. De forma geral os coeficientes obtidos para as redes européias mostram uma tendência aproximadamente linear dos coeficientes de rede, especialmente para o coeficiente em longitude.

As estações brasileiras apresentam maiores irregularidades, como mostra a figura 6.38. Para o satélite PRN 16 (193/2008), observa-se uma variação significativa nos valores de VTEC, logo após às 17:00h quando o satélite atingiu elevação máxima (45°). Os coeficientes expressam essa variação, quando chegam a atingir 4 ppm em latitude. Isto aconteceu porque os VTEC estimados pelas estações de referência sofreram variações entre 25 e 60 TECU em menos de três horas. Nesta mesma figura se percebe que os coeficientes de rede para o satélite

PRN 24 (193/2008) apresentam um comportamento mais regular que o satélite anteriormente analisado, variando entre 3 e 6 TECU em latitude. Nota-se que os valores de VTEC calculados pelas estações de referência apresentaram pequenas variações (entre 20 e 30 TECU) durante todo o tempo em que o satélite foi rastreado.

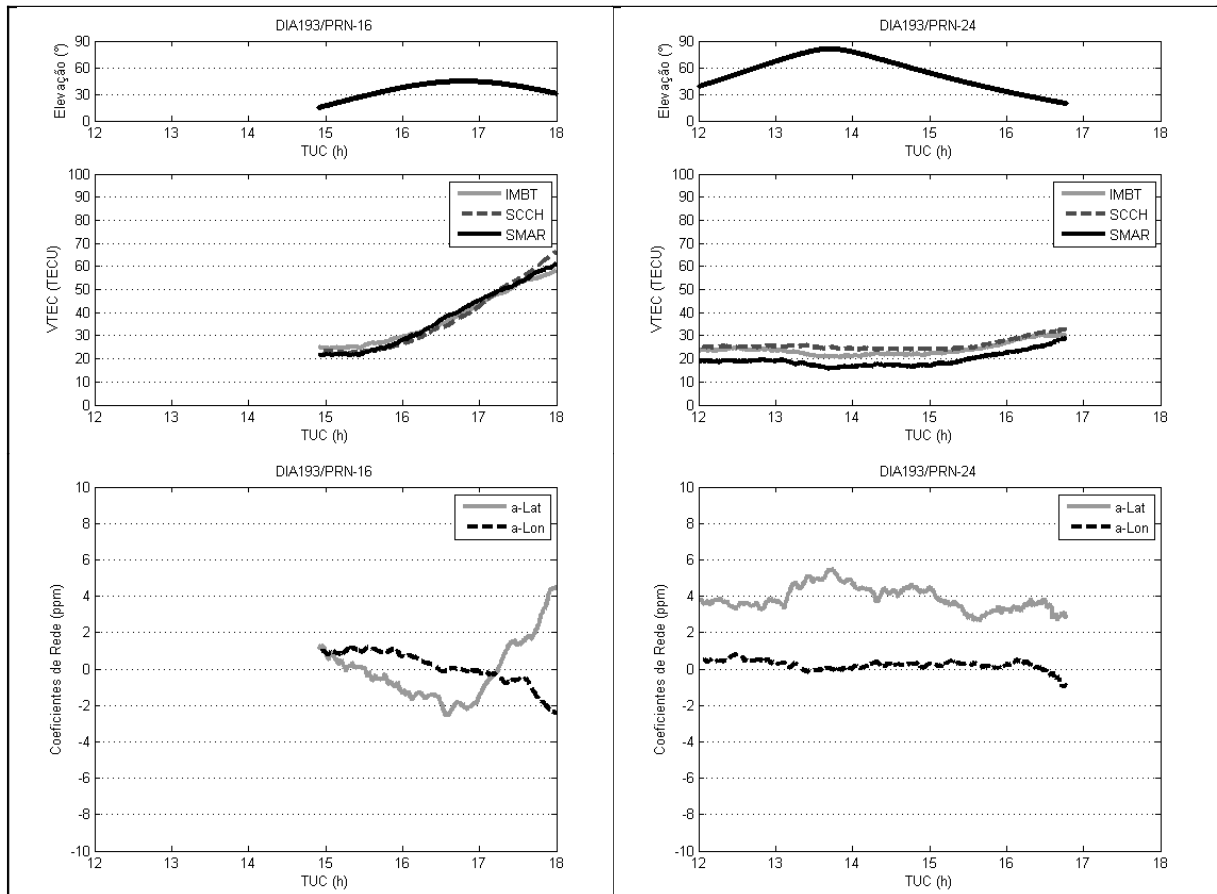


FIGURA 6.38 – VARIACÃO TEMPORAL DOS COEFICIENTES DE REDE (REDE BR-B)

A figura 6.39 mostra os coeficientes de rede para os satélites PRN 24 e PRN 30, na rede BR-D (198/2008). Para o satélite PRN 24 o coeficiente em longitude é mais regular que o da latitude, sendo que este variou de 1 a 4 ppm. Para o satélite PRN 30, no entanto, verificam-se variações significativas em ambas as direções, quando os coeficientes de rede atingem valores de 6 ppm para a longitude e 10 ppm para a latitude, momento em que o ângulo de elevação é de 15°.

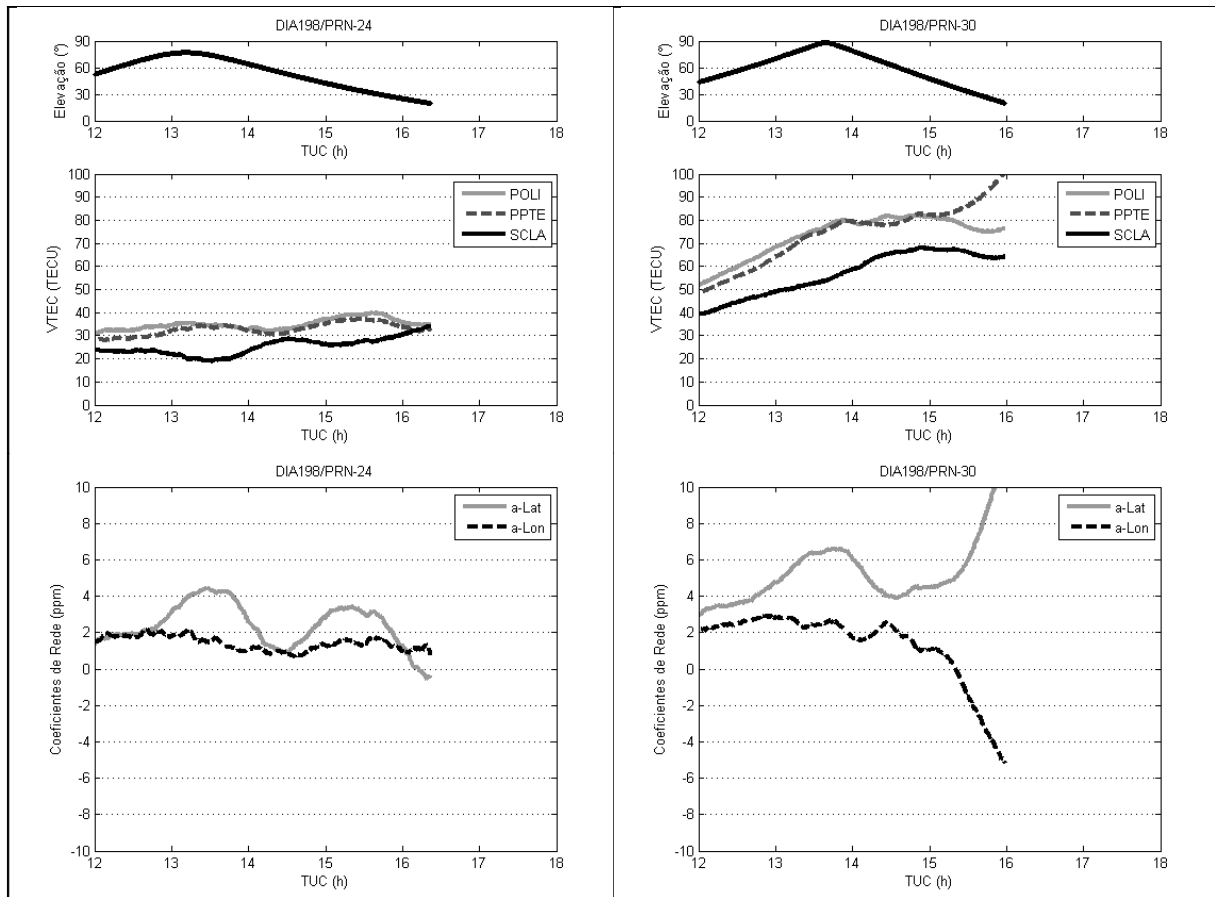


FIGURA 6.39 – VARIÇÃO TEMPORAL DOS COEFICIENTES DE REDE (REDE BR-D)

6.4 PP com modelagem ionosférica em rede (P_1 ou C/A + LTM)

A seguir serão mostrados os resultados do processamento PP empregando as observáveis P_1 ou C/A corrigidas do efeito ionosférico de acordo com a modelagem implementada. Para relembrar, as observações das estações de referência foram suavizadas pela fase da onda portadora de modo a se obter valores de VTEC mais precisos, e as observações da estação teste não foram suavizadas, de forma a minimizar a influência da segunda frequência no processamento.

A figura 6.40 mostra os resultados obtidos no processamento PP utilizando a modelagem ionosférica desenvolvida para as estações européias. Comparando as discrepâncias dos resultados obtidos com o modelo ionosférico local e aquelas em que foi empregada a combinação livre da ionosfera (figura 6.16 para as observações suavizadas e 6.18 para as não suavizadas), verifica-se que as discrepâncias são da mesma ordem de grandeza. Nestes três casos, o melhor desvio-padrão foi obtido

quando as observações foram suavizadas pela fase da onda portadora e o processamento se deu pela combinação livre da ionosfera.

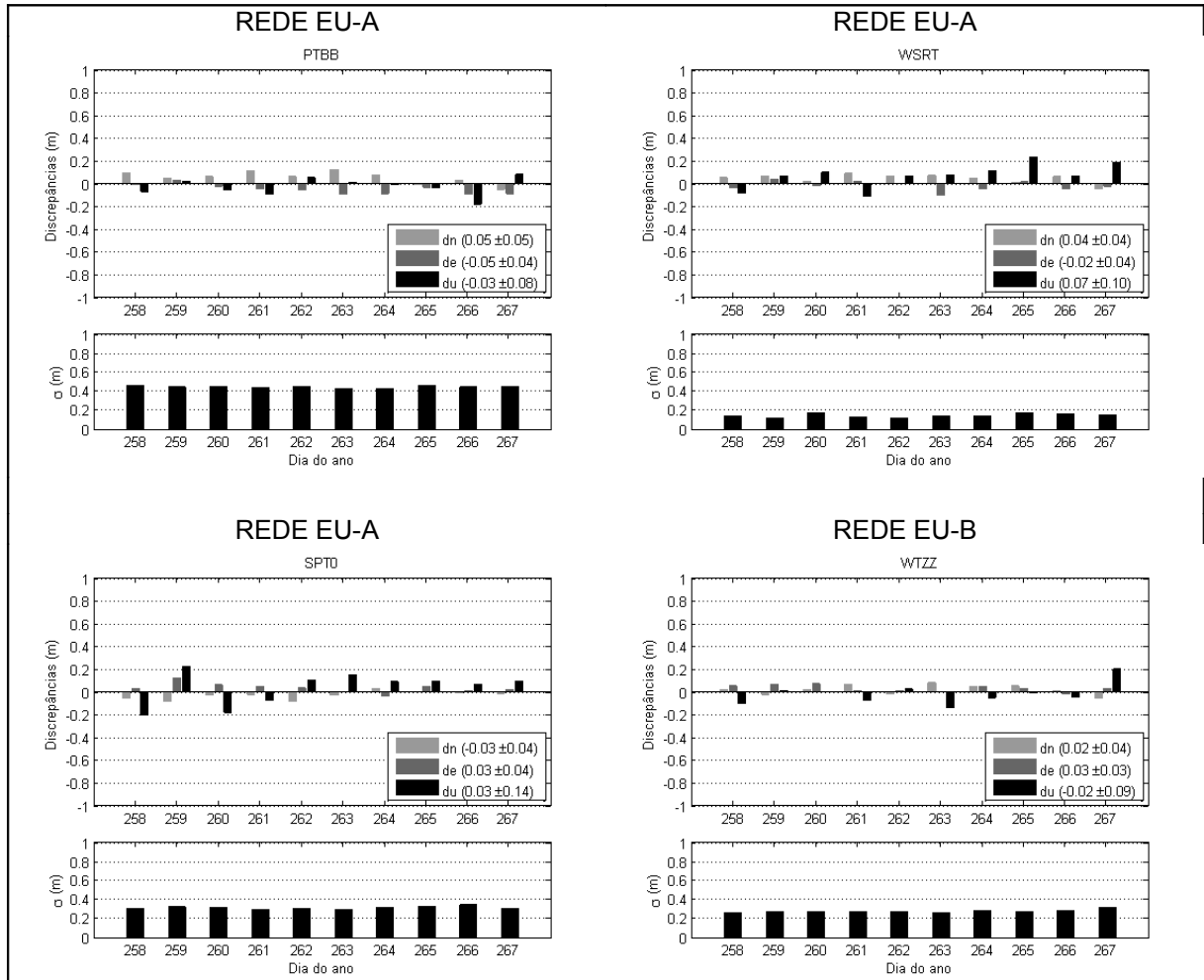


FIGURA 6.40 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (P_1 +LTM) – EUROPA

Para as estações da RBMC (figura 6.41) verificam-se discrepâncias maiores se comparado com os resultados do processamento empregando a combinação linear livre da ionosfera (figuras 6.17 para as observações suavizadas e 6.19 para as não suavizadas). Discrepâncias de até 0,8 m para as componentes altimétricas foram observadas, enquanto que para as componentes planimétricas de até 0,4 m. As discrepâncias altimétricas são em torno de 2 vezes maiores que as planimétricas e se constata que os resultados são altamente concordantes entre os dias consecutivos, sendo que os desvios-padrão ficaram entre 0,4 e 0,5 m.

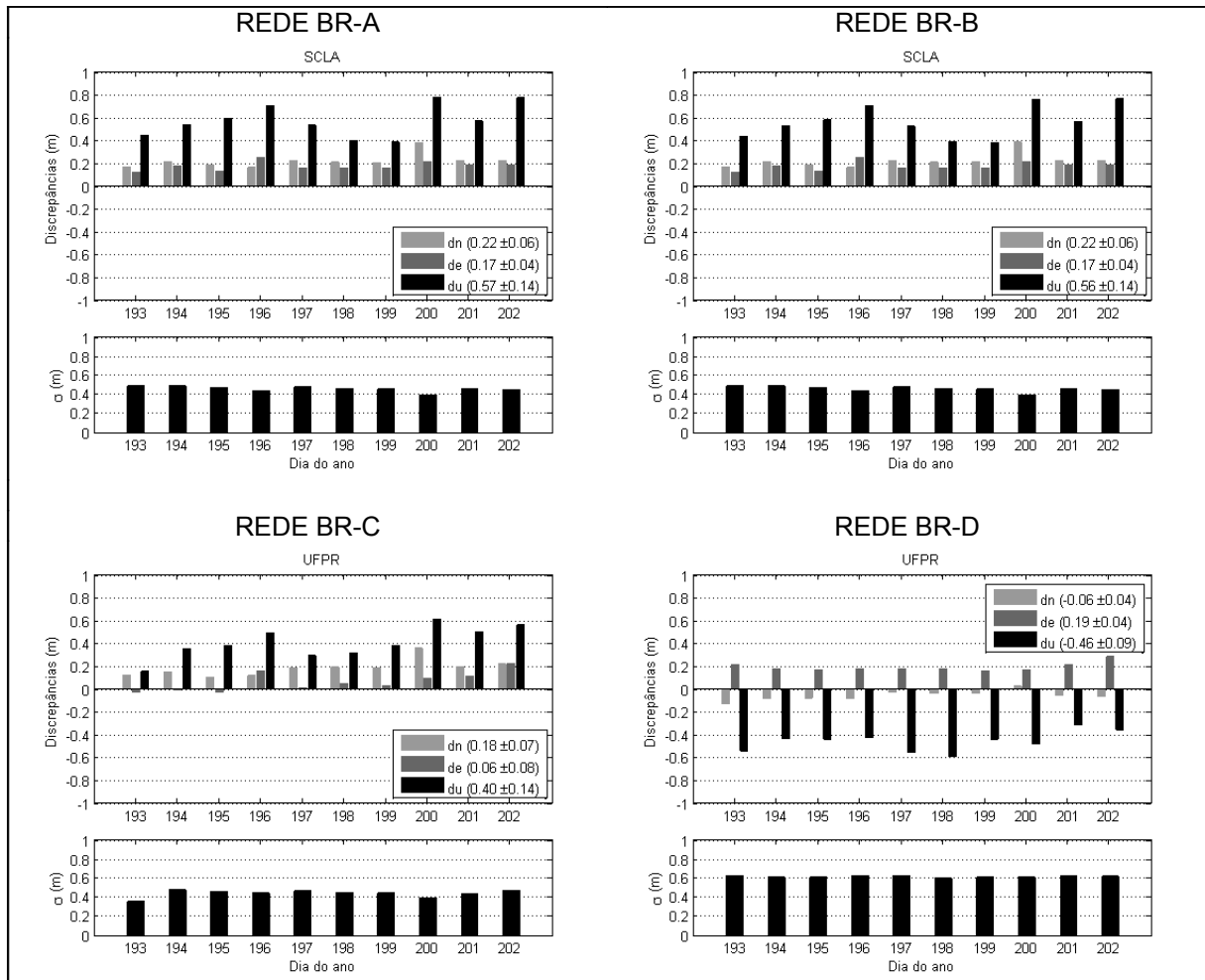


FIGURA 6.41 – RESULTADOS DO PROCESSAMENTO PP (C/A+LTM) – BRASIL

Para a estação UFPR observa-se como o sentido das três componentes se invertem ao se utilizar diferentes redes. Elas não utilizam nenhuma estação de referência em comum. Para evitar tais inconsistências nos resultados, verifica-se a necessidade de se empregar redes menores ou mais estações de referência na modelagem para que se chegue a um valor interpolado de VTEC mais coerente. Os resultados indicam que o processamento da estação UFPR utilizando informações da rede BR-C foi a que apresentou resultados mais parecidos com aqueles gerados com a combinação livre da ionosfera.

Apesar das discrepâncias serem maiores do que aquelas obtidas pela combinação livre da ionosfera, verifica-se que a modelagem conseguiu eliminar a maior parte dos erros devido à ionosfera. O processamento com o código sem fazer qualquer correção devido à ionosfera apresentou discrepâncias significativamente maiores, da ordem de alguns metros para a altimetria.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os experimentos foram conduzidos em duas regiões distintas com o objetivo de analisar os resultados obtidos em condições ionosféricas diversas: a primeira em latitudes médias (Europa Central) e a segunda na região equatorial (Sul do Brasil).

O método de posicionamento empregado nos experimentos foi o absoluto, sendo subdividido em posicionamento por ponto preciso (PPP) e posicionamento por ponto (PP). O primeiro emprega tanto observações de código quanto de fase, enquanto que o segundo somente observações do código. Para cada dia foi gerada uma única solução envolvendo todas as épocas de observação.

As estratégias de processamento para o PPP realizadas neste trabalho foram: a) empregando a combinação linear livre da ionosfera; b) sem correção ionosférica; c) empregando mapas globais de ionosfera; d) empregando mapas regionais de ionosfera criados para a região de estudo. O principal programa do Bernese para o processamento PPP é o GPSEST. Nele é possível escolher a observável de processamento, como operar com mapas de ionosfera no formato Bernese, além de várias outras opções de processamento.

Os melhores resultados do posicionamento absoluto foram obtidos no posicionamento por ponto preciso empregando a observável livre da ionosfera (L_3), como era de se esperar devido ao fato de que os efeitos de primeira ordem serem eliminados com o uso desta observável. Os experimentos nas estações europeias mostraram que as discrepâncias para as componentes planimétricas foram inferiores a 2 cm, em todos os dez dias de processamento, enquanto que as altimétricas foram inferiores a 3 cm. O desvio-padrão do ajustamento foi melhor que 0,6 cm em todos os casos. As estações brasileiras apresentaram discrepâncias um pouco maiores, mas mesmo assim inferiores a 3 cm para as componentes planimétricas e 5 cm para as componentes altimétricas. O desvio-padrão foi melhor que 0,4 cm em todas as situações. Esses resultados foram os obtidos para o processamento de 24 horas de observações, sendo que o intervalo de processamento foi de 5 minutos.

O mesmo processamento foi conduzido utilizando um intervalo menor de dados, de 6 horas. A época inicial foi das 12:00h às 18:00h (TUC). Este período foi escolhido em função de apresentar maior atividade ionosférica, próximo às 14h (hora local). Os resultados obtidos no processamento de 6h apresentou

discrepâncias e desvios-padrão da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos para o processamento de 24 horas.

Com o intuito de se quantificar o quanto o erro ionosférico atua no posicionamento, foi realizado o processamento PPP sem qualquer correção ionosférica. A única diferença em relação ao processamento (L_3) foi a observável de processamento (L_1). Nas etapas de detecção e correção de perdas de ciclo e suavização da pseudodistância o programa Bernese necessita observações (fase e código) de dupla frequência. Desta forma, os resultados mostrados neste estudo sempre terão a influência da segunda frequência, e possivelmente os resultados serão melhores do que aqueles que seriam obtidos se fossem utilizadas observações de uma única frequência durante todas as etapas de processamento. Os resultados para o processamento sem corrigir o efeito ionosférico mostraram discrepâncias que chegaram a ser superiores a 3 metros para a componente altimétrica e do metro para uma das componentes planimétricas.

Mapas globais de ionosfera gerados pelo CODE foram introduzidos no processamento e utilizados pelo GPSEST na estimativa das coordenadas das estações e de outros parâmetros. Neste processamento, a observável básica de processamento foi a fase na onda portadora L_1 . Os resultados mostram que o emprego de mapas globais de ionosfera corrige uma parte dos erros devido à esta fonte de erro. As discrepâncias planimétricas das coordenadas foram inferiores ao metro para as estações européias, mas em alguns casos elas foram superiores a 2 metros na altimetria. Para as estações brasileiras, no entanto, a aplicação de mapas da ionosfera não permitiu a obtenção de resultados melhores. Uma das explicações para isso se deve ao fato número reduzido de estações GPS utilizadas na América do Sul para a geração dos mapas globais de ionosfera.

Como os mapas globais de ionosfera não propiciaram resultados satisfatórios para nos experimentos, partiu-se para a geração de mapas regionais de ionosfera com o objetivo que esse efeito fosse modelado regionalmente. Não se verificou melhorias significativas nos resultados com o emprego de mapas regionais de ionosfera, o que permite concluir que os mapas gerados para as regiões de estudo não foram precisos o suficiente para corrigir o efeito ionosférico ao nível exigido para o PPP.

Após o processamento PPP com as estratégias citadas anteriormente, foram realizados processamentos PP, onde foram empregadas somente observações de

código. As estratégias de processamento e análise dos resultados para este posicionamento foram: a) empregando a combinação linear livre da ionosfera (P_3); b) sem correção ionosférica (P_1 ou C/A); c) empregando mapas regionais de ionosfera criados para a região de estudo (P_1 ou C/A + RIM); d) empregando correções geradas em rede pelo programa desenvolvido (P_1 ou C/A + LTM). O principal programa do Bernese para o processamento PP é o CODSP.

No posicionamento por ponto os melhores resultados foram obtidos quando se empregou a combinação linear livre da ionosfera, tanto por apresentar as menores discrepâncias, inferiores ao metro, quanto pelos menores desvios-padrão quando as pseudodistâncias foram suavizadas pela fase da onda portadora. Neste caso, os desvios-padrão foram de até 0,4 m, e quando se empregou as pseudodistâncias originais (não suavizadas) os desvios-padrão foram de até 1,5 m

Como o esperado, o processamento sem levar em conta o efeito ionosférico apresentou discrepâncias da ordem de alguns metros, especialmente para a componente altimétrica, chegando a 3 metros em média. As componentes planimétricas apresentaram discrepâncias inferiores, entre 0,60 e 0,80 m (componente norte) e desvios-padrão de até 0,60 m.

Nota-se que o emprego de mapas regionais de ionosfera no processamento PP trouxe melhoras no posicionamento se comparando àquele que não levou em consideração o efeito ionosférico. Verifica-se, no entanto, que a componente que apresentou maiores desvios foi a componente norte, quando o esperado era para a componente altimétrica.

Um programa foi desenvolvido para estimar o efeito ionosférico em rede e corrigir as observações de estações situadas na rede. Este programa é usado numa etapa intermediária de processamento com o Bernese. Primeiramente as etapas de pré-processamento são realizadas no Bernese, sendo principalmente a detecção e correção de perdas de ciclo e suavização das pseudodistâncias. Posteriormente, arquivos RINEX das estações de referência e a estação teste são processadas no programa desenvolvido, o qual gera arquivos RINEX de saída com observações originais corrigidas da refração ionosférica estimada em rede. Estes arquivos são introduzidas no Bernese para o processamento PP.

Antes do processamento PP empregando a modelagem desenvolvida foram realizadas algumas análises para verificar a qualidade da modelagem. Foram

analisados: o número de satélites utilizados na modelagem, discrepâncias entre os valores de VTEC interpolados e observados e os coeficientes de rede.

O número de satélites observados simultaneamente em todas as estações influi diretamente no posicionamento final. Para as redes européias EU-A e EU-B, utilizando as estações teste PTBB, SPT0 e WSRT, verifica-se que o número de satélites foi de 4 a 8. Para as estações brasileiras BR-A, BR-B e BR-C, com as estações teste SCLA e UFPR, também foram observados de 4 a 8 satélites. As estações da rede BR-D, com a estação teste UFPR, observaram um número de satélites que variou de 6 a 8. Constatou-se, que em alguns dias, houve ausência de observações. Nestes casos, as causas podem ser devido à falta de observações (observações não foram coletadas para determinado satélite em determinada época) ou problemas na modelagem.

As discrepâncias entre o valor de VTEC interpolado com as informações da rede e o observado, utilizando observações de dupla frequência, foi quantificado para 11 satélites na região européia e 12 satélites na brasileira. Estes satélites foram observados em quase todos os dias. Além das discrepâncias, foram calculados os desvios-padrão das discrepâncias, e os resultados mostram que o valor máximo foi de 2 TECU para as estações européias. As estações brasileiras, com exceção de dois casos, apresentou desvios-padrão inferiores que 3,50 TECU.

Outra análise realizada foi por meio do erro relativo. Este erro mostra o quanto o valor interpolado foi diferente do valor observado, em média. Para as estações européias o erro máximo variou entre 10% e 18%, sendo de 8% em média. Isto significa que valores de VTEC interpolados conseguiram eliminar em média 92% do erro ionosférico.

As estações brasileiras apresentaram erros maiores, chegando a valores superiores a 40%. Mas o erro relativo foi de 13% em média, ou seja, 87% do erro foi corrigido. Dentre os motivos que causaram erros maiores para as estações brasileiras, cita-se: os DCB foram estimados para cada estação com uma precisão inferior aos utilizados pelas estações européias, inconsistências na aplicação dos DCB nas estações e localização das estações empregadas nos experimentos, na região equatorial, onde os maiores picos da densidade de elétrons são observados. Contudo, observa-se uma forte correlação entre os valores interpolados e observados, indicando que os erros podem ser de natureza sistemática.

Observou-se que a extrapolação dos valores para uma estação fora da rede apresentou resultados satisfatórios. Porém, não foi quantificado o quanto uma estação pode se afastar da rede. No exemplo em questão, a estação SPT0 estava 80 km da estação mais próxima.

A interpretação geométrica dos coeficientes de rede é que eles representam a declividade da superfície linear usada na modelagem. Em poucos casos foram observados coeficientes com valores superiores a 10 ppm. Nota-se que de forma geral os coeficientes em latitude apresentam maiores valores e foram mais irregulares.

Outros fatores que influenciam sobremaneira a modelagem é a elevação dos satélites. Observações oriundas de satélites com ângulo de elevação baixo podem afetadas com mais intensidade por alguns erros (multicaminho, por exemplo), e para reduzir esses erros, o ângulo de elevação escolhido para a modelagem e processamentos foi de 15° . Ângulo de corte maior (20° , por exemplo) faz com que menos satélites sejam observados simultaneamente em todas as estações. As dimensões da rede também influenciam na modelagem, pois com o aumento das linhas de base entre as estações de referência se observa que os erros de interpolação também crescem devido às diferentes condições ionosféricas em cada estação.

Após a análise da qualidade do modelo, partiu-se para o processamento PP empregando a modelagem ionosférica implementada. Para as estações européias se constatou que as correções forneceram resultados da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos por meio da combinação linear livre da ionosfera e os desvios-padrão apresentaram valores inferiores a 0,60 m. Para as estações brasileiras, verificou-se discrepâncias maiores, mas mesmo assim os resultados foram satisfatórios, pois se obteve discrepâncias inferiores a 1 metro para todas as estações em todos os dias. Os desvios-padrão foram de até 0,60 m.

As observações da estação UFPR foram processadas por duas redes: BR-C e BR-D. Estas redes não tinham nenhuma estação de referência em comum, e as discrepâncias obtidas em cada caso foram diferentes. Entretanto, as soluções foram similares entre os dias consecutivos. Isto mostra como os resultados dependem da rede utilizada, e uma forma de minimizar inconsistências é empregar mais estações de referência, e assim estimar coeficientes de rede que representem melhor o erro modelado.

Apesar do posicionamento que emprega a modelagem ionosférica desenvolvida não apresentar discrepâncias menores ou iguais àqueles obtidos no processamento com a observável livre da ionosfera (P_3), eles são passíveis de serem comparados.

Os resultados obtidos da modelagem ionosférica desenvolvida mostram que as correções geradas conseguiram eliminar o efeito da ionosfera (92% para as estações europeias e 87% para as brasileiras, em média), quando comparadas com as correções geradas pela própria estação, empregando observações de dupla frequência e a mesma observável (código).

RECOMENDAÇÕES

No decorrer do trabalho, observou-se que alguns assuntos merecem mais investigações ou não foram abordados, portanto ficam como recomendações para trabalhos futuros:

- Gerar correções ionosféricas em rede e aplicá-las na fase da onda portadora, permitindo o processamento por ponto preciso. Verificar se as correções ionosféricas obtidas por observações de dupla frequência do código suavizadas, são precisas o suficiente para o processamento PPP, quando se espera a convergência das ambiguidades a valores constantes e coordenadas com discrepâncias da ordem do dm/cm.
- Ampliar o número de estações ligadas em rede. Um número maior de estações de referência permite que o método dos mínimos quadrados estime, além dos parâmetros, a precisão de cada um deles. Um maior número de estações de referência também permite eliminar estações que apresentam problemas, sem causar grandes prejuízos ao usuário, pois este poderá utilizar as estações restantes na modelagem.
- Melhorar a integridade do sistema. A estação teste deve receber somente correções onde não haja dúvida quanto à sua integridade, dentro de um intervalo de confiança. Para isso é necessário aplicar testes estatísticos com o objetivo de gerar indicativos da qualidade das correções.

- Implementar outros modelos matemáticos para a interpolação. Com um número maior de estações é possível aplicar outros modelos, os quais podem ser escolhidos em função de alguns fatores, como: número de estações, tamanho da rede, geometria da rede, entre outros.
- Analisar a eficiência do modelo em função da distância da estação teste em relação às estações de referência.
- Avaliar o quanto a degradação introduzida pelo processo de extrapolação dos valores de VTEC se reflete no posicionamento.
- Estimar o DCB das estações de referência no próprio processo de modelagem ionosférica, reduzindo a necessidade de programas ou arquivos externos para a modelagem.
- Empregar redes com distância entre as estações de referência inferiores às aquelas utilizadas nesta pesquisa, e analisar os resultados.
- Avaliar a qualidade do posicionamento e da modelagem em períodos de maior atividade ionosférica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SALAM, M. A. **Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations**. Dissertation of Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, 2005.

AGUIAR, C. R. **Modelo regional da ionosfera (MOD_ION): implementação em tempo real**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005

AGUIAR, C. R. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida em: 04/06/2009.

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.

BÁEZ, J. C. **Monitoramento das deformações da rede de referência do SIRGAS em área com atividade tectônica**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2006.

BATISTA, I. S. **Notas de aula do curso “Introdução à ionosfera e a propagação de ondas”**, ministrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, 2003.

BRAASCH, M. S. **Multipath effects**. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER, J. J., Global positioning system: theory and applications. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, v.II, p. 547-568, 1996.

BRUNINI, C.; MEZA, A.; AZPILICUETA, F.; DIAZ, A. VAN ZELE, M. A. **A new ionosphere monitoring technology based on GPS**. Astrophysics and Space Science, Volume 290, Numbers 3-4, pp. 415-429, April, 2004.

BRUNNER, F. K.; GU, M. **An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations**. Manuscripta Geodaetica, 16:205-214, 1991.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

CARARO, A. C. **Correções relativísticas sobre as medidas de tempo GPS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2006.

CPLAT, CENTRO DE PROCESAMIENTO LA PLATA. Disponível em: <<http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/>>. Acesso em: 20/06/2009.

COVE, K.; SANTOS, M. C.; WELLS, D., BISNATH, S. **Improved tropospheric delay estimation for long baseline, carrier phase differential GPS positioning in a coastal environment**. Proceedings of the Institute of Navigation GNSS-2004, 21-24 September, 2004, Long Beach, CA, USA, pp. 925-932, 2004.

DACH, R; HUGENTOBLE, U.; FRIDEZ, P.; MEINDL, M. **Bernese GPS software version 5.0**, User manual of the Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland, January 2007.

DAI, L.; WANG, J.; RIZOS, C. HAN, S. **Real-time carrier phase ambiguity resolution for GPS/GLONASS reference station networks**. Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy. Geomatics & Navigation (KIS 2001), Banff, Canada. 5-8 June, 475-481, 2001.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados**. 2ª. Edição. Curitiba, 2004.

DeMETS, C., GORDON, R. G., ARGUS, D. F.; STEIN, S. **Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions**, Geophysical Research Letters, 21(20), 2191–2194, 1994.

DIVIS, D. A. **SA: going to way of the dinosaur**. GPS World, June 2000.

EL GIZAWY, M. L. **Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users**. M.Sc. Thesis, Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20171, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 2003.

FAUSTINO, R. C. **Posicionamento por ponto preciso estático e cinemático: implementação e análise**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

FEDRIZZI, M. **Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial). São José dos Campos: INPE, 142 p., 1999.

FOULGER, G. R.; BEUTLER, G.; BILHAM, R.; EINARSSON, P.; FANKHAUSER, S.; GURTNER, W.; HUGENTOBLE, U.; MORGAN, J.; ROTHACHER, M.; THORBERGSSON, G.; WILD, U. **The Iceland 1986 GPS geodetic survey: tectonic goals and data processing results**. Bulletin Géodésique, Springer-Verlag, 67, 148-172, 1993.

FONSECA JUNIOR, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FREIBERGER JUNIOR, J. **Investigações sobre a calibração de antenas GPS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2007.

GAO, Y.; CHEN, K. **Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products**. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 3, No. 1-2:95-100, 2004.

GAO, Y.; WOJCIECHOWSKI, A. **High precision kinematic positioning using single dual-frequency GPS receiver**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV-B3, pp 845-850, 2004.

GARNÉS, S. J. dos A. **Resolução das ambiguidades GPS para linhas de base curta: análise dos algoritmos de otimização**. Curitiba, 2001. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M.; SHI, C.; LIU, J. **Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations**. Journal of Geodesy, Volume 82, Issue 7, pp.389-399, 2007.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Editora da UFPR, Curitiba 1994.

GFZ, GEOFORSCHUNGSZENTRUM. Disponível em: <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/niemegk/kp_index/description/>. Acesso em: 12/10/2007.

GFZ, GEOFORSCHUNGSZENTRUM. Disponível em: <<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/tab/>>. Acesso em: 05/01/2009.

GREGORIUS, T. **GIPSY-OASIS II – How it works**. Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne, October, 1996.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation and integration**. Second edition, Wiley, 2007.

GURTNER, W. **RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11**, Astronomical Institute, University of Berne, 2007.

HATCH, R. **Synergism of GPS code and carrier measurements**. Proceedings of The Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, New Mexico State university, Las Cruces, New Mexico, Feb., 1982, pp.1213-1232.

HATCH R. **Dynamic differential GPS at the centimeter level**. In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, April 28 – May 2, vol 2: 1287-1298, 1986.

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.; COLLINS, J. **Global positioning system: theory and practice**. Springer-Verlag/Wien, Fourth revised edition, 1994.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS theory and practice**. Fifth, revised edition, SpringerWienNewYork, 2001.

HUGENTOBLE, U.; SCHAER, S.; FRIDEZ, P. **Bernese GPS software version 4.2**, Documentation of the Bernese GPS Software Version 4.2, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, February, 2001.

HUINCA, S. C. M. **Calibração relativa de antenas GNSS na BCAL/UFPR**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2009.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 15/12/2008.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Disponível em: <<http://www.ppp.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 14/05/2009.

ICD-GPS-200C. **NAVSTAR GPS Space Segment / Navigation User Interfaces: Interface Control Document ICD-GPS-200C**. Revision: IRN-200C-004. ARINC Research Cooperation, CA, 2000.

IGS, International GNSS Service. Data & Products. Disponível em: <<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: 14/05/2007.

IGS, INTERNATIONAL GNSS SERVICE. IGS Stations, Disponível em: (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/list.html>). Acesso em: 25/02/2009.

IGS, INTERNATIONAL GNSS SERVICE. General Information About the IGS Products. Disponível em: <<http://acc.igs.org/>>. Acesso em: 07/01/2009a.

ITRF, INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME. Disponível em: <<http://itrf.ensg.ign.fr/>>. Acesso em: 15/08/2008.

JENSEN, A. B. O.; OVSTEDAL, O. **The effect of different tropospheric models on precise point positioning in kinematic mode**. Survey Review, 40, 308 pp. 173-187, April, 2008.

JPL, JET PROPULSION LABORATORY. The NASA Global Differential GPS System. Disponível em: <<http://www.gdgps.net/products/orbit-clock-corrections.html>>. Acesso em: 12/02/2009.

JPL, JET PROPULSION LABORATORY. The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS (GDGPS) System. Disponível em: <<http://apps.gdgps.net/>>. Acesso em: 15/06/2009b.

KECHINE, M. O.; TIBERIUS, C. C. J. M.; van der MAREL, H. **Real-time kinematic positioning with NASA's Global Differential GPS System**. University of Delft, The Netherlands, GNSS Conference, St. Petersburg, Russia, May, 2004.

KEE, C.; WALTER, T.; ENGE, P.; PARKINSON, B. **Quality control algorithms on wide- area reference station for WAAS**. Institute of Navigation, Proceedings of the 52nd Annual Meeting, Cambridge, MA, June, 19-21, 1996.

KING, M.; EDWARDS, S; CLARKE,P. **Precise Point Positioning: breaking the monopoly of relative GPS processing**. Engineering Surveying Showcase. October, 2002.

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

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency users**. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-23, No. 3, May, 1987.

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

KOMJATHY, A. **Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System**. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 248 pp, 1997.

KOUBA, J.; HÉROUX, P. **Precise point positioning using IGS orbit and clock parameters**. *GPS Solutions*. V.5, N0.2, pp.12-28, 2001.

KOUBA, J. **A guide to using international GPS service (IGS) products**. Geodetic Survey Division. Natural Resources Canada. February, 2003.

KOUBA, J. **Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)**. *Journal of Geodesy*, Volume 82, Issue 4-5, pp. 193-205, 2007.

KOUBA, J. **A guide to using international GNSS service (IGS) products**. Geodetic Survey Division. Natural Resources Canada, Mai, 2009.

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.

LANGLEY, R. **Innovation column**. INSIGHTS. INNOVATION, Survey & Construction. *GPS World*, April 2007. Disponível em:
<<http://www.nxtbook.com/nxtbooks/questex/gps0407/>>. Acesso em: 18/05/2007.

LANGLEY, R. **Expert advice: cause identified for pseudorange error from new GPS satellite SVN49**. *GPS World*, July 13, 2009. Disponível em:
<<http://www.gpsworld.com/gnss-system/expert-advice-cause-identified-pseudorange-error-new-gps-satellite-svn49-6902>>. Acesso em: 21/09/2009.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. Third Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C.; LANGLEY, R. B. **GAPS: the GPS analysis and positioning software – a brief overview**. Proceedings of ION GNSS 2007, Fort Worth, TX, September, 2007.

LILJEQUIST, G. H.; CEHAK K. **Allgemeine Meteorologie**. 3 Auflage, Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig, 1994.

LIU, Z. **Ionosphere tomographic modeling and applications using Global Positioning System (GPS) measurements**. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canadá, 2004.

LUO, X.; MAYER, M.; HECK, B. **Impact of various factors on the quality of site-specific neutrospheric parameters within GNSS data processing: a case study**. Boletim de Ciências Geodésicas., Curitiba, v. 14, no 4, p.461-481, out-dez, 2008.

MADER, G. L. **GPS Antenna calibration at the national geodetic survey**. GPS Solutions, Volume 3, Number 1, p. 50-58, July, 1999.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

MAYER, M. **Modellbildung für die Auswertung von GPS-Messungen im Bereich der Antarktischen Halbinsel**. Dissertationen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, No. 597, München, Germany, 2006.

McCARTHY, D. D. **IERS Conventions (1996) - IERS Technical note 21**, IERS Conventions, July, 1996.

McCARTHY, D. D.; PETIT, G. **IERS Conventions (2003)**. IERS Technical Note, 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004.

McNamara, L. F. **The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding**. Ed. E. F. Strother, Krieger Publishing Company, Malabar, FL, USA, 1991.

MELBOURNE, W. G. **The case for ranging in GPS based geodetic systems**. First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, MD, U.S.A, April 15- 19, 1985.

MENDES, V. B. **Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques**. Ph.D. Dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, Canada, 353pp, 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo, Editora UNESP, 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento por ponto de alta precisão utilizando o GPS: uma solução para a Geodinâmica**. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 18. No. 1. São Paulo, Março 2000a.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**, São Paulo, Editora UNESP, p. 476, 2008.

NRCAN, NATURAL RESOURCES CANADA. Online Global GPS Processing Service (CSRS-PPP). Disponível em:
<http://www.geod.nrcan.gc.ca/products-produits/ppp_e.php>. Acesso: 22/05/2009.

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

ODIJK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays**. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2002.

RAY, J.; SENIOR, K. **Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements**. Metrologia, 42(4), 215-232, 2005.

RODRIGUES, F. da S. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS**. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial), INPE, São José dos Campos, 2003.

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

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. **Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações**, Brazilian Journal of Geophysics, vol. 18(2), 2000.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.

SATIRAPOD C.; RIZOS C.; WANG, J. **GPS single point positioning with SA off: how accurate can we get?**. Survey Review, 36(282), 255-262, 2000.

SATIRAPOD C.; LUANSANG M. **Comparing stochastic models used in GPS precise point positioning technique**. Survey Review, 40, 308 pp., 188-194, April, 2008.

SCHAER, S.; BEUTLER, G.; MERVART, L.; ROTHACHER, M.; WILD, U. **Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable**. paper presented at the 1995 IGS Workshop, Potsdam, Germany, May 15-17, 1995.

SCHAER, S. **Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System**. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 59, 1999.

SEEBER, G., **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 589 p., 2003.

SHEN, X.; GAO, Y. **Kinematic processing analysis of carrier phase based precise point positioning**. FIG XXII International Congress. Washington, D.C., USA, April 19-26, 2002.

SIRGAS, SISTEMA GEOCÊNTRICO DE REFERÊNCIA PARA AS AMÉRICAS. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/>>. Acesso em: 05/06/2008.

SOARES, W. A. **Investigação de uma modelagem matemática como alternativa para aumento da área de cobertura de estações de referência DGPS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2005.

SPILKER, J. J. **Tropospheric effects on GPS**. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER, J. J. Global positioning system: theory and applications. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, v.II, p. 517-546, 1996.

SPRINGER, T. A. **Modeling and validating orbits and clocks using the Global Positioning System**, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 60, 2000.

SPRINGER, T.; DILSSNER, F. **SVN49 and other GPS anomalies – elevation-dependent pseudorange errors in Block IIRs and IIR-Ms**. InsideGNSS, July/August, 2009.

TEFERLE, N.; ORLIAC, E.; BINGLEY, R. **Bernese GPS Software Precise Point Positioning (PPP) for Geodynamic Applications**, Presented at COMET - Advances in GPS Data Processing and Modelling for Geodynamics, London, United Kingdom, 9-10 November 2005.

TEUNISSEN, P. J. **The GPS phase-adjusted pseudorange**. In: Proceedings of the Second International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart/Freudenstadt, pp 115-125, November, 1991.

VERONEZ, M. R. **Proposta de um modelo regional da ionosfera para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método sequencial de ajustamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

WANNINGER, L. **Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the ionosphere**. Proceedings of ION GPS-95, Palm Springs, pp. 55-62, Sep. 12-15, 1995.

WANNINGER, L. **Real-time differential GPS error modeling in regional reference station networks**. Proceedings of IAG Scientific Assembly, IAG Symp. 118, Springer Verlag, 86-92, Rio de Janeiro, 1997.

WANNINGER, L. **Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning**. Proceedings of ION GNSS 2004, Long Beach, CA, 2849-2854, 2004.

WANNINGER, L. **Introduction to network RTK**. IAG Working Group 4.5.1: Network RTK. Disponível em <<http://www.network-rtk.info>> Acesso: 27/08/2006.

WEBSTER, I. R. **A regional model for the prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System**. M.Sc.E. thesis, Department of Surveying Engineering, Technical Report No. 166, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 124 pp, 1993.

WILD, U. **Ionosphere and geodetic satellite systems, permanent GPS tracking data for modelling and monitoring**, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 48, 1994.

WILSON, B. D.; YINGER, C. H.; FEESSE, W. A.; SHANK, C. C. **New and improve: the broadcast interfrequency biases**. GPS World, v.10, n.9, p.56-66, September, 1999.

WITCHAYANGKOON, B. **Elements of GPS precise point positioning**. Doctor of Philosophy (in Spatial Information Science and Engineering). The University of Maine, December, 2000.

WÜBBENA, G. **Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements**. In: Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, MD, U.S.A, pp. 403–412, 15–19 April, 1985.

WÜBBENA, G.; BAGGE, A.; SCHMITZ, M. **Network-based techniques for RTK applications**. GPS Symposium, GPS JIN 2001, GPS Society, Japan Institute of Navigation, November 14-16, 2001, Tokyo, Japan.

WÜBBENA, G.; WILLGALIS, S. **State space approach for precise real time positioning in GPS reference networks**. Presented at International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation. KIS-01, Banff, June 5-8, Canada, 2001.

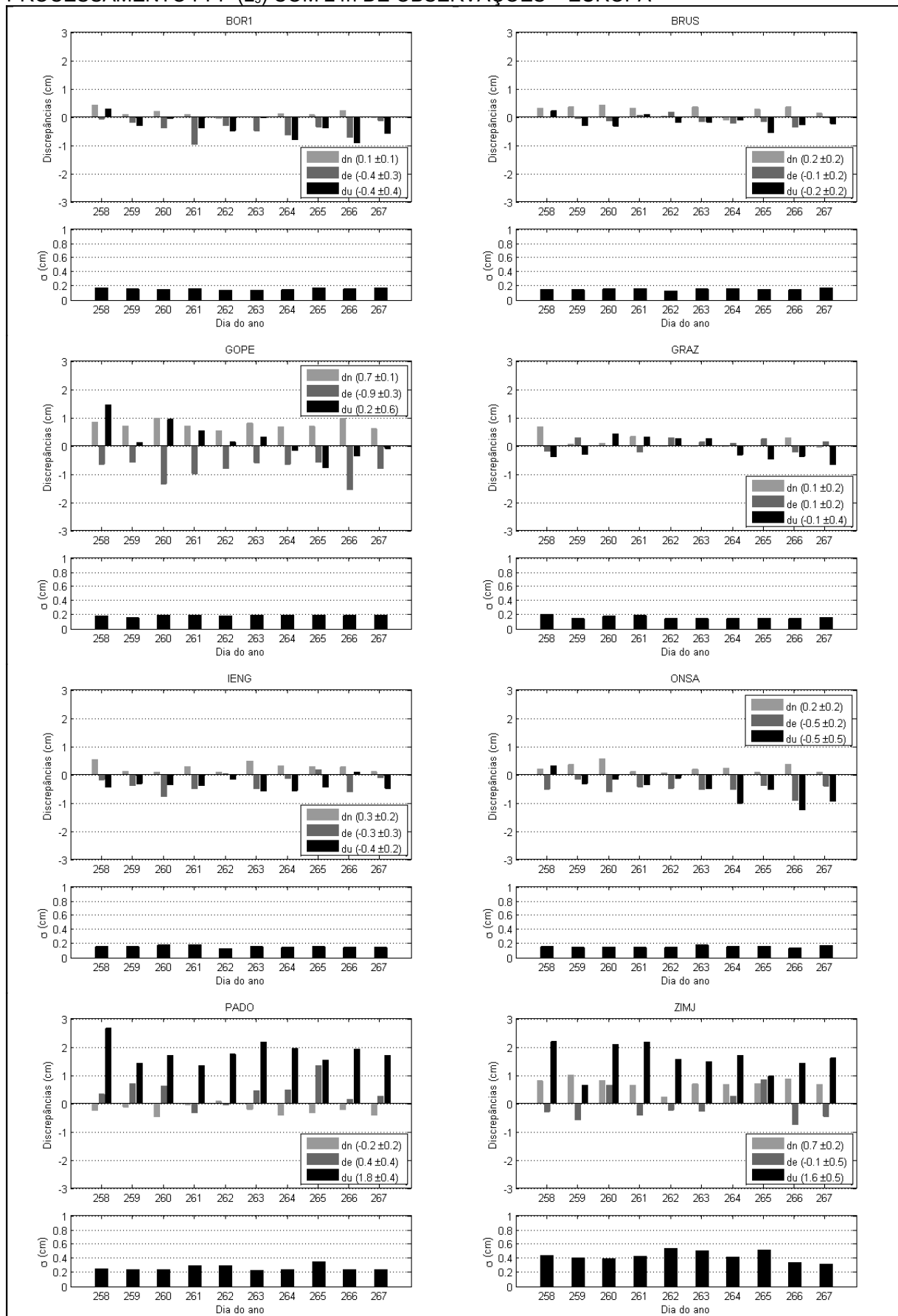
WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; BAGGE, A. **PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks**. Presented at the 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California.

XU, G. **GPS: theory, algorithms and applications**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.

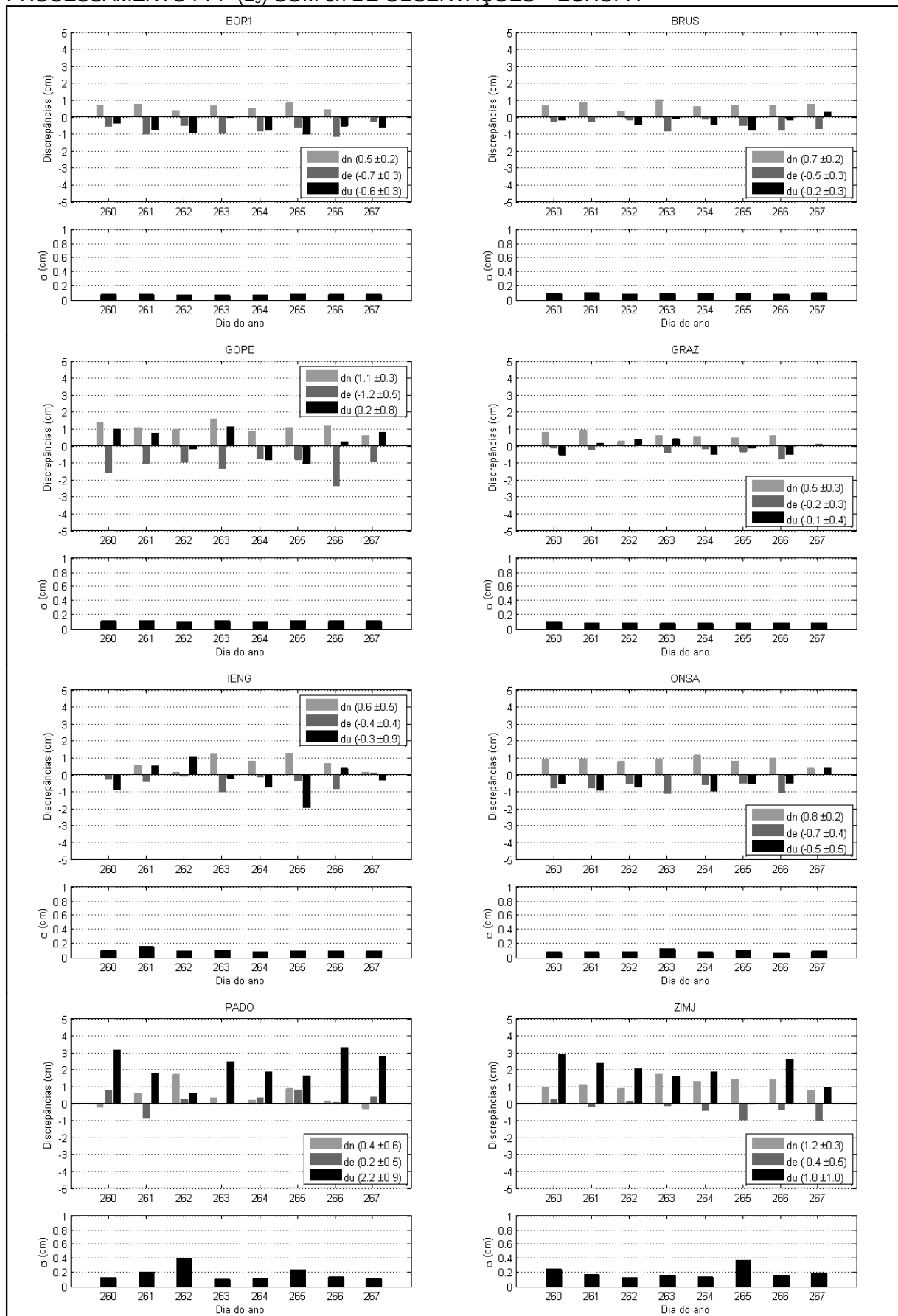
ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. **Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks**. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No. B3, p. 5005-5017, March 10, 1997.

APENDICE A

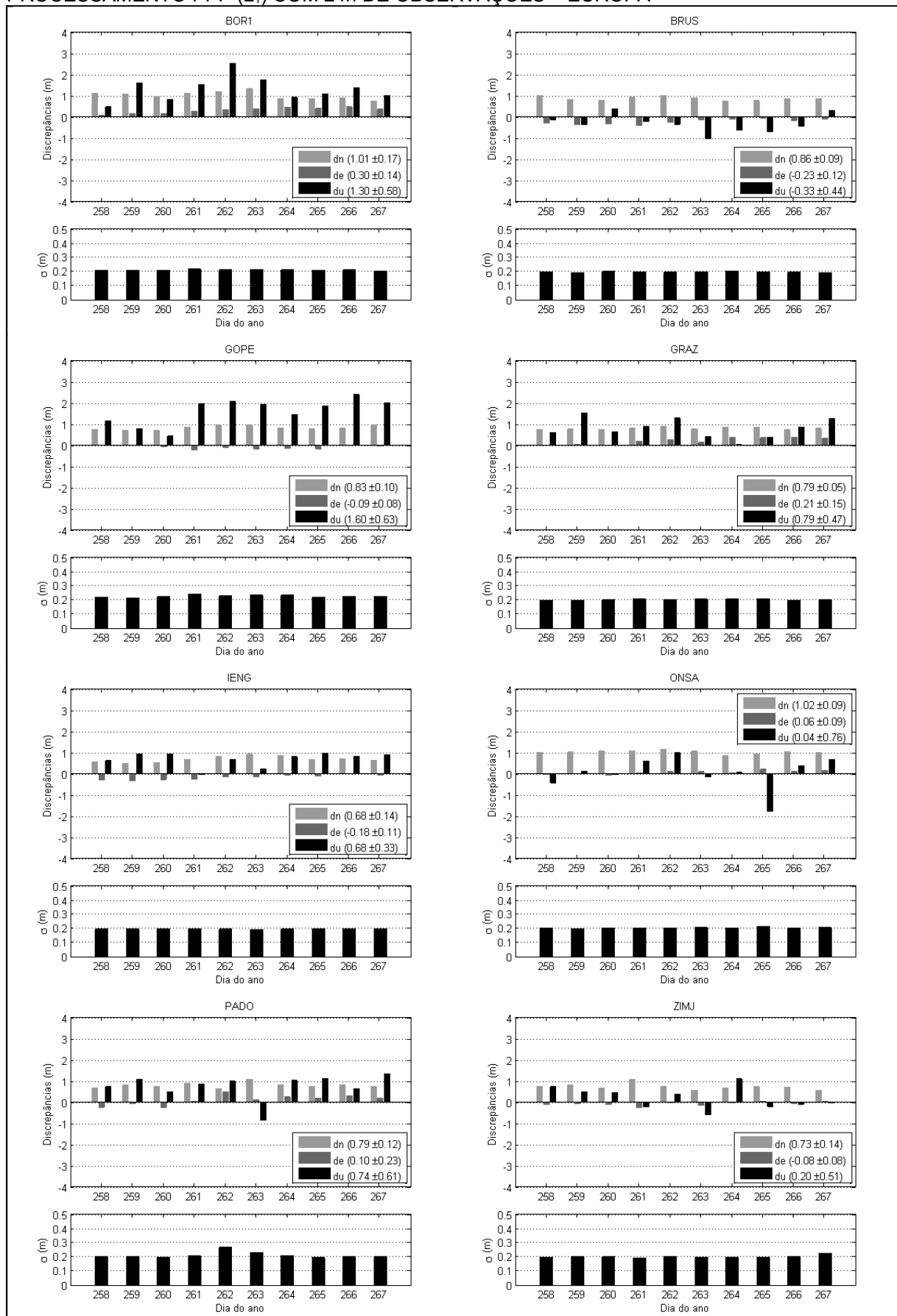
PROCESSAMENTO PPP (L₃) COM 24h DE OBSERVAÇÕES – EUROPA



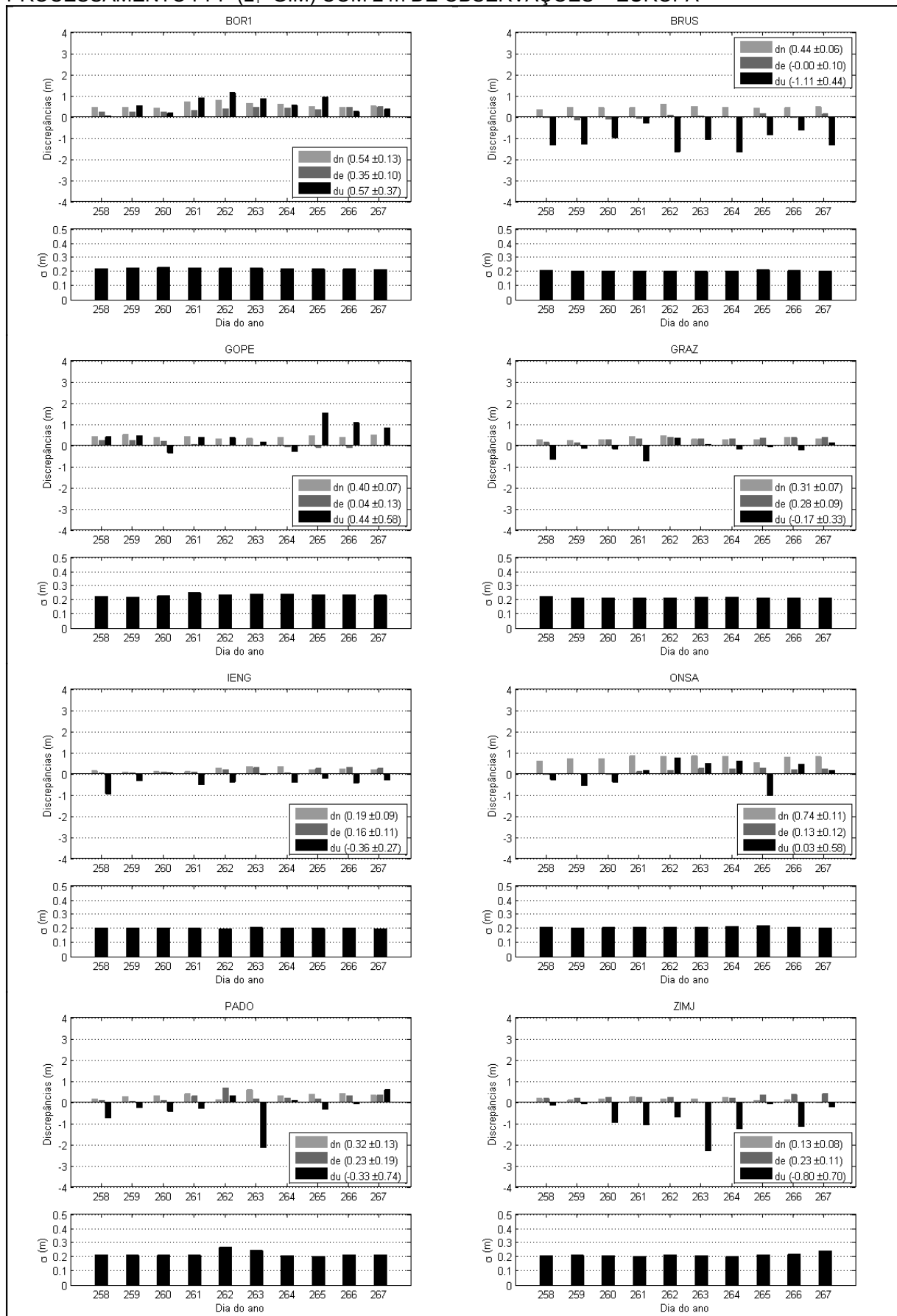
PROCESSAMENTO PPP (L₃) COM 6h DE OBSERVAÇÕES – EUROPA



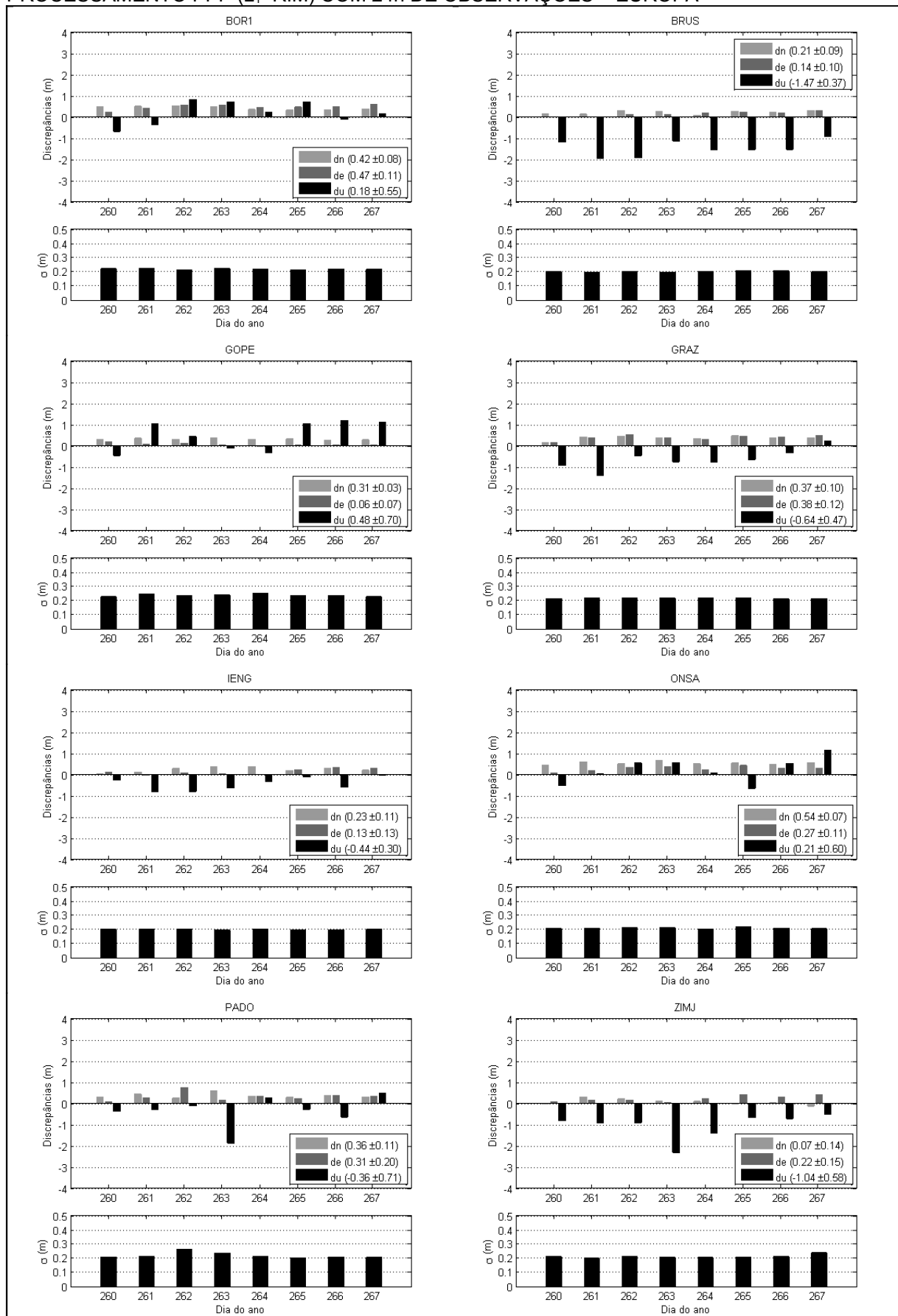
PROCESSAMENTO PPP (L₁) COM 24h DE OBSERVAÇÕES – EUROPA



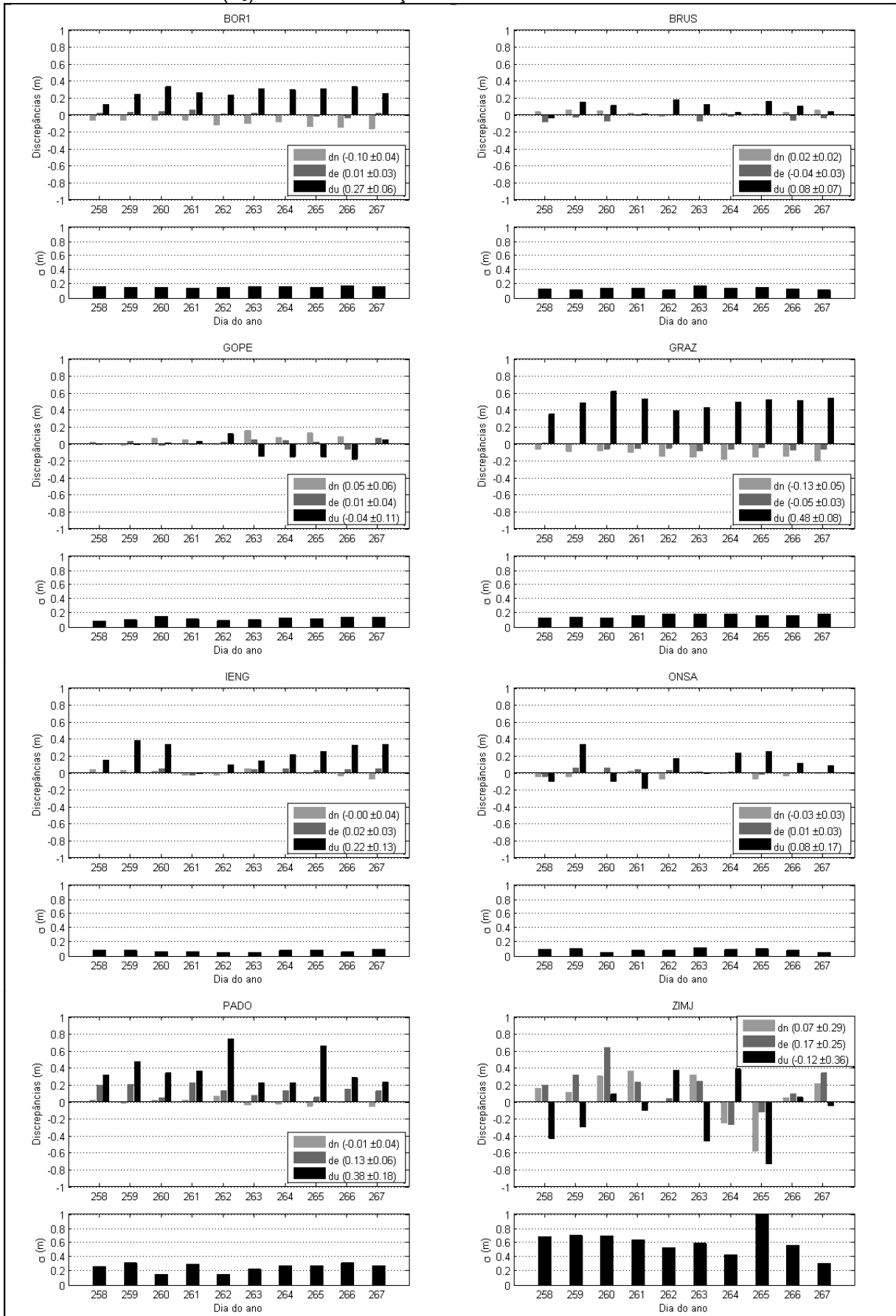
PROCESSAMENTO PPP (L₁+GIM) COM 24h DE OBSERVAÇÕES – EUROPA



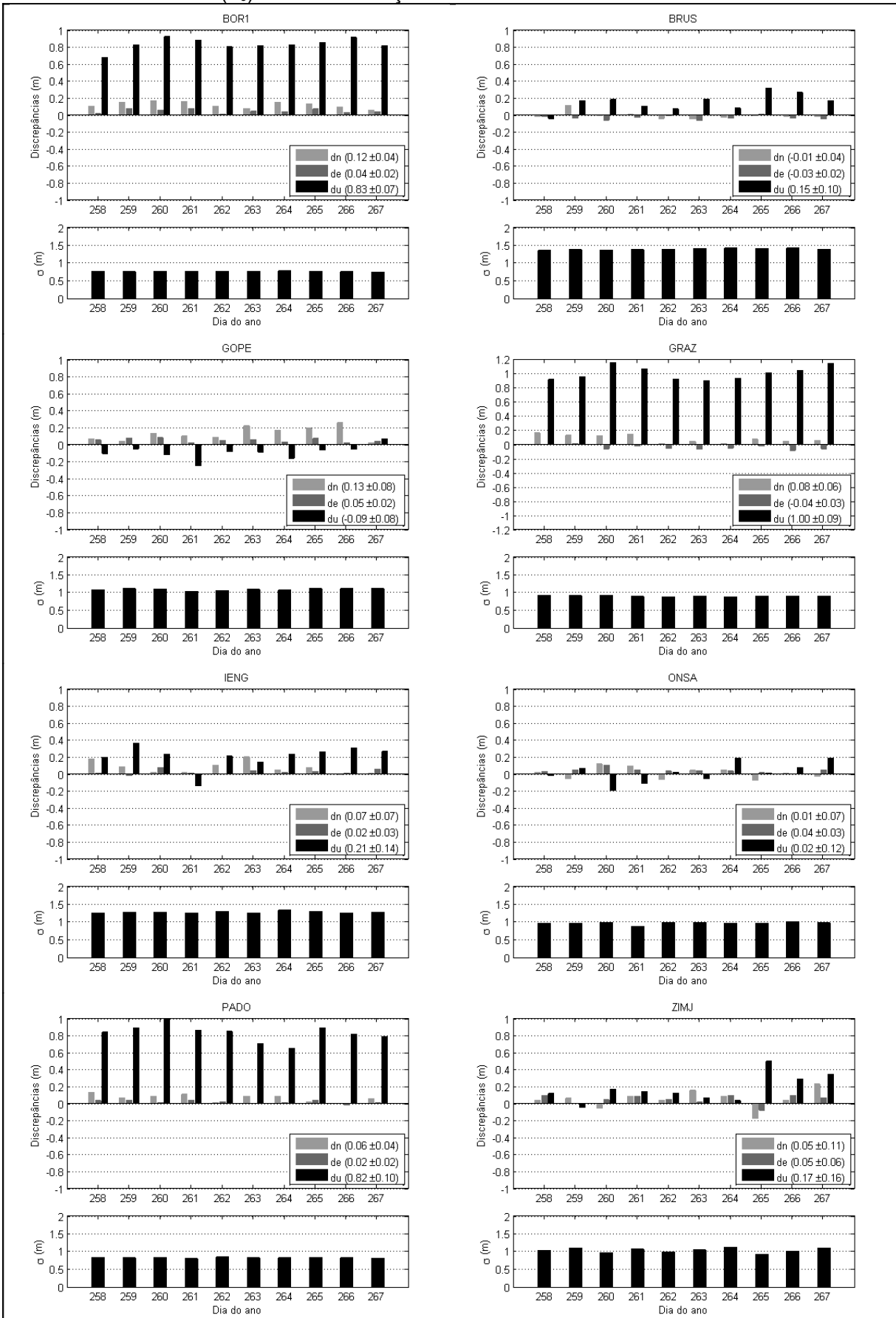
PROCESSAMENTO PPP (L₁+RIM) COM 24h DE OBSERVAÇÕES – EUROPA



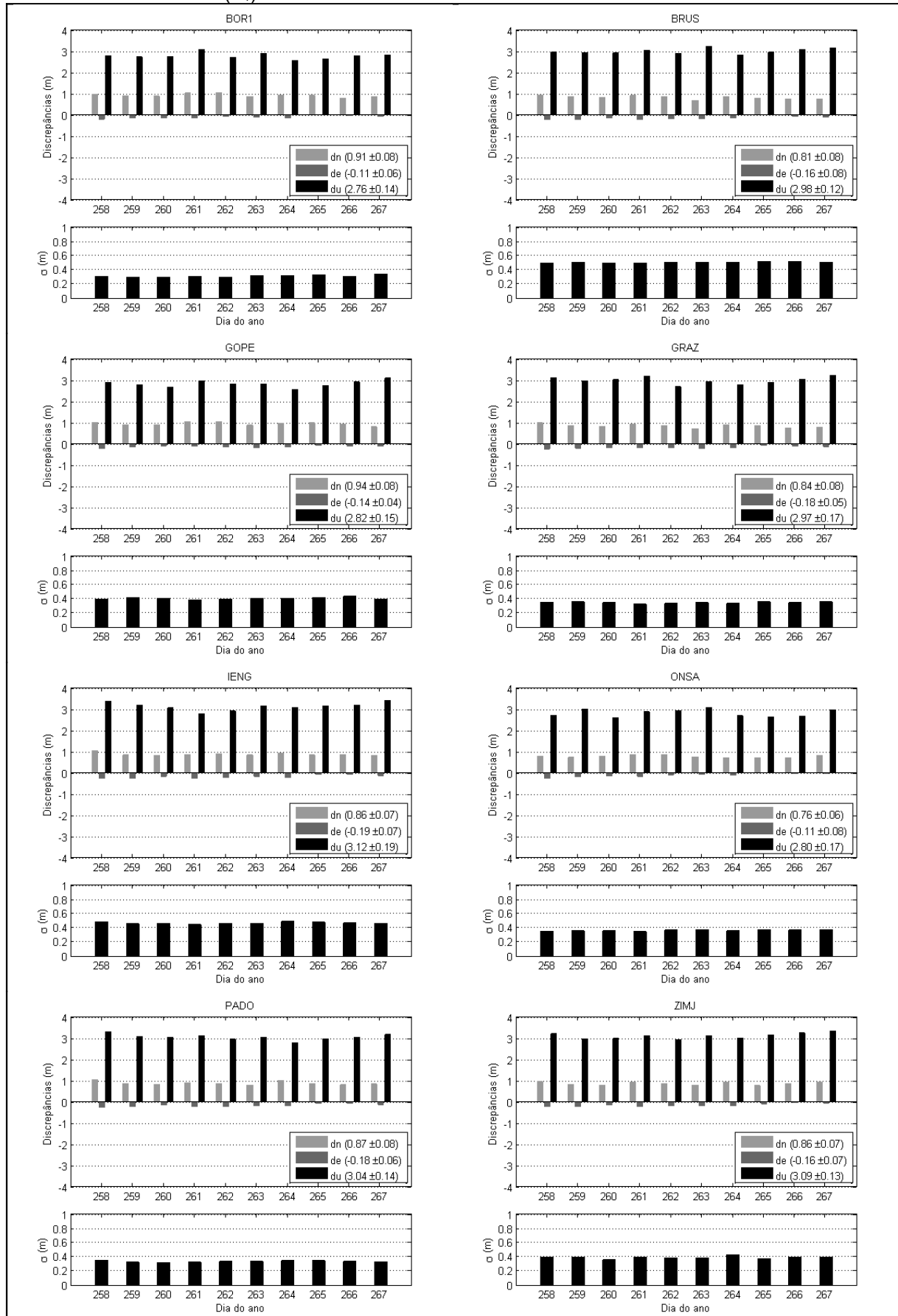
PROCESSAMENTO PP (P₃) COM SUAVIZAÇÃO – EUROPA



PROCESSAMENTO PP (P₃) SEM SUAVIZAÇÃO – EUROPA



PROCESSAMENTO PP (P₁) – EUROPA



PROCESSAMENTO PP (P₁+RIM) – EUROPA

