

**MARIA LÍGIA CHUERUBIM**

**INTEGRAÇÃO DE REDES GNSS  
LOCAIS AO SIRGAS**



**PRESIDENTE PRUDENTE  
2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

**MARIA LÍGIA CHUERUBIM**

# **INTEGRAÇÃO DE REDES GNSS LOCAIS AO SIRGAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

**Orientador: Prof. Dr. João Carlos Chaves**

**Co-Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico**

**PRESIDENTE PRUDENTE  
2009**

Chuerubim, Maria Lúgia.  
C486i Integração de Redes GNSS locais ao SIRGAS / Maria Lúgia  
Chuerubim. - Presidente Prudente : [s.n], 2009  
xiv, 180 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Orientador: João Carlos Chaves  
Banca: Paulo de Oliveira Camargo, Sônia Maria Alves Costa  
Inclui bibliografia

1. Integração de redes GNSS. 2. Combinação de equações  
normais. 3. SIRGAS. 4. SINEX. I. Autor. II. Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

CDD(18.ed.) 621.71

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Presidente Prudente.

BANCA EXAMINADORA

*João Carlos*

PROF. DR. JOAO CARLOS CHAVES  
(ORIENTADOR)

*Sônia Costa*

PROFA. DRA. SONIA MARIA ALVES COSTA  
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

*Paulo*

PROF. DR. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO  
FCT/UNESP

*Maria Lígia Chuerubim*  
MARIA LÍGIA CHUERUBIM

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 26 DE OUTUBRO DE 2009

RESULTADO:

APROVADO

## **DADOS CURRICULARES**

**Maria Lígia Chuerubim**

NASCIMENTO: 16/02/1983 – Santa Rosa de Viterbo – SP

FILIAÇÃO: Getúlio Pedro Chuerubim

Izildinha Aparecida Belavenuto Chuerubim

2002-2006: Graduação

Bacharelado em Engenharia Cartográfica

Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2007-2009: Pós-Graduação

Mestrado em Ciências Cartográficas

Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

## DEDICATÓRIA

A DEUS, meu porto seguro, por tornar tudo possível!

À minha amada mãe, Izildinha (Dona Nenê), que representa meu maior exemplo de superação, pelo carinho e apoio incondicionais em todos os momentos difíceis de minha vida.

Ao meu querido pai, Getúlio, pelo empenho em tornar os meus e os nossos sonhos realidade.

À minha preciosa irmã, Fernanda, pelo carinho e incentivo demonstrados ao longo dessa caminhada.

Ao Tim, *in memoriam*, por fazer parte da minha trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por ter me dado sabedoria para enfrentar todos os momentos de dificuldade e por me propiciar realizar mais essa conquista.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, campus de Presidente Prudente, por ter me concedido bolsas de estudos ao longo do cursinho e de toda a minha graduação, e que me motivaram a continuar meus estudos e a alcançar essa enorme realização pessoal e profissional.

À agência CNPq pelo apoio financeiro destinado ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao meu orientador Dr. João Carlos Chaves, por compreender a importância deste trabalho para a minha vida.

Ao meu co-orientador Dr. João Francisco Galera Monico pela confiança e colaboração no desenvolvimento dessa pesquisa, e pelas críticas que contribuíram ao meu amadurecimento pessoal e profissional.

Aos professores do Departamento de Cartografia e aos funcionários da FCT que de forma direta ou indireta contribuíram no desenvolvimento dessa dissertação.

À Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pelos dados fornecidos para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A Dr<sup>a</sup> Sônia Maria Alves Costa e sua equipe do IBGE, em especial ao Alberto Luís da Silva, que colaboraram com sugestões e críticas para este trabalho.

Aos membros do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE), pelas discussões científicas e valiosas contribuições a esta dissertação.

À Daniela Barroca Marra Alves, por me mostrar que DEUS escolhe o momento certo em que pessoas substâncias passam a fazer parte de nossas vidas, e pelas valiosas contribuições científicas nesta pesquisa.



Ao Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa, meu grande amigo e excelente pesquisador, pela apoio, críticas e incentivo, e por me mostrar que DEUS tem um propósito para a vida de cada um.

À família Poleszuk, pelo apoio, incentivo e críticas, só verdadeiros amigos nos mostram valores invisíveis aos olhos.

À Aline Sayuri Ishikawa e família, pelos momentos felizes que passamos juntos, pela motivação, carinho e atenção a mim dedicados.

À Luisa Sakurada, minha amiga “japa”, por sua alegria de viver e bela amizade.

À Erynat Fátima Fernandes, pelas palavras de conforto, carinho e otimismo a mim direcionadas.

Aos amigos da sala de permanência da Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), pelo apoio, debates, companheirismo e momentos de descontração.

Aos familiares e demais amigos que sempre me incentivaram e acreditaram no meu trabalho.

## EPÍGRAFE

### *DAS UTOPIAS*

*“Se as coisas são inatingíveis... ora!  
Não é motivo para não querê-las...  
Que tristes os caminhos se não fora  
A mágica presença das estrelas!”*

*(Mário Quintana - Espelho Mágico )*

## RESUMO

A característica continental do Brasil implica na necessidade de constantes desafios científicos em pesquisas espaciais e tecnológicas, que visam contribuir com o desenvolvimento e ao engajamento de centros de pesquisa nacionais e internacionais, fornecendo instrumentos às atividades espaciais no país e no mundo, ampliando as perspectivas de aplicação das ciências e técnicas geodésicas espaciais como o GPS (*Global Positioning System*) em diversos setores da sociedade, bem como a compreensão e integração das atividades espaciais desenvolvidas no país em âmbito internacional. Neste contexto, destaca-se a contribuição do IGS (*International GNSS Service*) com os centros regionais de análise e processamento da rede SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) os IGS-RNAAC-SIR (IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS) como o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no que concerne à manutenção e densificação do SIRGAS, disponibilizando soluções semanais no formato SINEX (*Software INdependent EXchange Format*), referenciadas ao ITRS (*International Terrestrial Reference System*), que posteriormente são integradas no contexto de uma solução regional pelo DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*), com base em modelos e convenções adotadas internacionalmente. Assim, a participação de organizações responsáveis por atividades que contemplam ciência, tecnologia, processamento e análises de dados de diversos centros, bem como o desenvolvimento de produtos, é de essencial contribuição ao desenvolvimento de pesquisas nas mais diversas sub-áreas das Geociências, em especial, em um país de extensão continental como o Brasil. Nesta perspectiva, este projeto visa desenvolver uma metodologia de integração de redes GNSS locais no contexto de uma solução regional para o Brasil. Para tanto, foram utilizados dados gerados em território nacional pelas redes ativas RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e a Rede GNSS SP (Rede GPS Ativa do oeste do Estado de São Paulo), bem como soluções SIRGAS no formato SINEX, utilizando o princípio da combinação das equações normais pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), contribuindo com a manutenção e densificação da rede SIRGAS e ao desenvolvimento de pesquisas em território nacional, com soluções mais consistentes e homogêneas.

**PALAVRAS CHAVES:** Integração de redes GNSS, combinação de equações normais, SIRGAS, SINEX.

## ABSTRACT

The continental characteristic of Brazil implies in the necessity of constant scientific challenges in space and technological research, that they aim at to contribute with the development and to the engagement of national and international centers of research, supplying instruments to the space activities in the country and the world, enlarging the perspectives of application of the sciences and space geodesic techniques as GPS (Global Positioning System) in diverse sectors of the society, as well as the understanding and integration of the space activities developed in the country in international scope. In this context, it is distinguished contribution of the IGS (International GNSS Service) with the regional processing and analysis center of the SIRGAS network (Geodetic Reference System for Americas) the IGS-RNAAC-SIR (IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS) as the IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics) with respect to the maintenance and densificação of the SIRGAS network, providing weekly solutions in format SINEX (Software INdependent EXchange Format), referenced to ITRS (International Terrestrial Reference System), that later are integrated in the context of a regional solution for DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut), with base in models and conventions adopted internationally. Thus, the participation of responsible organizations for activities that contemplate science, technology, processing and analyses of data of several centers, as well as the development of products, is of essential contribution to the development of research in the most diverse sub-areas of the Geociences, in special, in a country of continental extension as Brazil. In this perspective, this project aims at to develop a methodology of integration of local GNSS networks in the context of a regional solution for Brazil. For in such a way, were used data generated in national territory by the active network RBMC (Brazilian Network of Continuous Monitoring) and by GNSS SP network (Active Network GPS of the west of the State of São Paulo), as well as solutions SIRGAS in format SINEX, using the beginning of the combination of the normal equations for the MMQ (Method for Least-Squares Adjustment), contributing with the maintenance and densificação of net SIRGAS and to the development of research in national territory, with more consistent and homogeneous solutions.

**KEY WORDS:** Integration of GNSS networks, combination of normal equations, SIRGAS, SINEX.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Causa do movimento de Precessão da Terra.....	28
Figura 2 – Campanha GPS SIRGAS2000.....	37
Figura 3 - Estações da RBMC.....	40
Figura 4 - Estações que contribuem com o RNAAC-SIR.....	44
Figura 5 - Rede GNSS SP.....	45
Figura 6 - Pontos e superfícies de referência de uma antena GPS.....	73
Figura 7 - Variações do centro de fase e pontos de referência da antena.....	74
Figura 8 - Processo de integração e densificação de redes geodésicas.....	79
Figura 9 – Localização Geográfica das Placas Litosféricas.....	93
Figura 10 – Correlação entre as soluções locais e globais.....	96
Figura 11 - Metodologia de integração de redes GNSS.....	103
Figura 12 – Variação média anual do efeito de 2ª ordem na observável L1 para a estação PPTE.....	107
Figura 13 – Variação média anual do efeito de 2ª ordem na observável L2 para a estação PPTE.....	107
Figura 14 – Variação média anual do efeito de 3ª ordem na observável L1 para a estação PPTE.....	107
Figura 15 – Variação média anual do efeito de 3ª ordem na observável L2 para a estação PPTE.....	108
Figura 16 – Variação média anual do efeito de 2ª ordem na observável L1 para a estação BRAZ.....	108
Figura 17 – Variação média anual do efeito de 2ª ordem na observável L2 para a estação BRAZ.....	108
Figura 18 – Variação média anual do efeito de 3ª ordem na observável L1 para a estação BRAZ.....	109
Figura 19 – Variação média anual do efeito de 3ª ordem na observável L2 para a estação BRAZ.....	109
Figura 20 – Discrepância entre as soluções geradas com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a componente Este.....	110
Figura 21 – Discrepância entre as soluções geradas com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a componente Norte.....	111

Figura 22 – Discrepância entre as soluções geradas com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a componente Vertical.....	111
Figura 23 – Discrepância na componente Leste entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação BRAZ.....	112
Figura 24 – Discrepância na componente Norte entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação BRAZ.....	112
Figura 25 – Discrepância na componente Vertical entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação BRAZ.....	113
Figura 26 – Discrepância na componente Leste entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação PPTE.....	113
Figura 27 – Discrepância na componente Norte entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação PPTE.....	113
Figura 28 – Discrepância na componente Vertical entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação PPTE.....	114
Figura 29 – Discrepâncias entre a solução final e a solução SIR09P01 na época 2007,507 para a componente Este.....	118
Figura 30 - Discrepâncias entre a solução final e a solução SIR09P01 na época 2007,507 para a componente Norte.....	119
Figura 31 - Discrepâncias entre a solução final e a solução SIR09P01 na época 2007,507 para a componente Vertical.....	119
Figura 32 – Série temporal para a componente Leste da estação BRAZ.....	120
Figura 33 – Série temporal para a componente Norte da estação BRAZ.....	120
Figura 34 – Série temporal para a componente Vertical da estação BRAZ.....	121
Figura 35 – Série temporal para a componente Leste da estação SANT.....	121
Figura 36 – Série temporal para a componente Norte da estação SANT.....	122
Figura 37 – Série temporal para a componente Vertical da estação SANT.....	122
Figura 38 – Série temporal para a componente Leste da estação NAUS.....	122
Figura 39 – Série temporal para a componente Norte da estação NAUS.....	123
Figura 40 – Série temporal para a componente Vertical da estação NAUS.....	123
Figura 41 – Distribuição mensal das ocorrências de cotas máximas e mínimas anuais para o Rio Amazonas com base em dados da estação de monitoramento Óbidos para o período de 1968 a 2009.....	124
Figura 42 - Discrepâncias entre velocidade obtida e a velocidade SIR09P01 na época para a componente Este.....	127

Figura 43 - Discrepâncias entre velocidade obtida e a velocidade SIR09P01 para a componente Norte.....	128
Figura 44 - Discrepâncias entre velocidade obtida e a velocidade SIR09P01 para a componente Vertical.....	128
Figura 45 – Mapa das discrepâncias obtidas entre as velocidades das estações estimadas e a solução SIR09P01.....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros definidores do GRS80.....	34
Tabela 2 - Parâmetros de transformação entre as realizações ITRF2005 e ITRF2000.....	35
Tabela 3 - Parâmetros definidores dos GRS adotados no Brasil.....	41
Tabela 4 - Erro máximo devido à ionosfera, em metros, para as medidas obtidas na vertical.....	55
Tabela 5 - Estratégia de Processamento dos dados GPS.....	100
Tabela 6 - Módulos utilizados no Bernese na obtenção das equações normais diárias.....	101
Tabela 7 - Variação média anual dos efeitos de 2ª e 3ª ordem para a fase e para o código nas portadoras $L_1$ e $L_2$ .....	106
Tabela 8 - Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final do trabalho e as fornecidas pela solução SIR09P01 na época de referência (2007,507).....	116
Tabela 9 - Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final do trabalho e as fornecidas pela solução SIR09P01.....	125



## LISTA DE SIGLAS

<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
APCV	<i>Absolute Phase Center Variations</i>
APKIM 2002	<i>Actual Plate Kinematic Model</i>
ARP	<i>Antenna Reference Point</i>
BIH	<i>Bureau International d'Heure</i>
BKG	<i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i>
BPE	<i>Bernese Processing Engine</i>
BRS	<i>Barycentric Reference System</i>
CCRS	<i>Conventional Celestial Reference System</i>
CDDIS	<i>Crustal Dynamics Data Information System</i>
CEO	<i>Celestial Ephemeris Origin</i>
CEP	<i>Celestial Ephemeris Pole</i>
CGRS	<i>Celestial Geocentric Reference System</i>
CIMA	<i>Centro de Procesamiento Ingeniería-Mendoza-Argentina de la Universidad Nacional del Cuyo</i>
CIP	<i>Celestial Intermediate Pole</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination for Europe</i>
CORS	<i>Continuously Operating Reference Stations</i>
COSMIC	<i>Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere &amp; Climate</i>
CTP	<i>Conventional Terrestrial Pole</i>
CTRS	<i>Conventional Terrestrial Reference System</i>
DCB	<i>Differential Code Biases</i>
DD	<i>Dupla Diferença</i>
DoD	<i>U. S. Department of Defense</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite</i>
DGFI	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EGM	<i>Earth Gravity Model</i>
EOP	<i>Earth Orientation Parameters</i>
ERP	<i>Earth Rotation Parameters</i>
GEGE	<i>Grupo de Estudos em Geodésia Espacial</i>

GIM	<i>Global Ionosphere Map</i>
GPT	<i>Global Pressure and Temperature</i>
GOCE	<i>Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRS	<i>Geodetic Reference System</i>
GRS24	<i>Elipsóide Internacional de Hayford</i>
GRS67	<i>Geodetic Reference System 1967</i>
GRS80	<i>Geodetic Reference System 1980</i>
GST	<i>Greenwich Sideral Time</i>
hPa	hecto-Pascal
HPPS	<i>High Precise Positioning Service</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IAGA	<i>International Association of Geomagnetism and Aeronomy</i>
IAU	<i>International Astronomical Union</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDS	<i>International DORIS Service</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference System Service</i>
IGAC	<i>Instituto Geográfico Agustín Codazzi</i>
IGGOS	<i>Integrated Global Geodetic Observing System</i>
IGN	<i>Institute Géographique National</i>
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGS05	<i>IGS Reference Frame 05</i>
IGS-RNAAC-SIR	<i>IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS</i>
IMF	<i>Isobaric Mapping Function</i>
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
ITESP	Instituto de Terras do Estado de São Paulo
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
IVS	<i>International VLBI Service for Geodesy and Astronomy</i>
LLR	<i>Lunar Laser Range</i>
Quasar	<i>Quase Estelar Radio Source</i>

MAGNA-SIRGAS	<i>Marco Geocêntrico Nacional de Referencia</i>
MAGNA-ECO	<i>MAGNA Estaciones Continuas</i>
MMQ	<i>Método dos Mínimos Quadrados</i>
MVC	<i>Matriz Variância-Covariância</i>
NGS	<i>National Geodetic Survey</i>
NMF	<i>Niell Mapping Function</i>
NNR	<i>No Net Rotation</i>
NNR-NUVEL 1A	<i>No Net Rotation – Northwestern University VELocity model 1A</i>
NNT	<i>No Net Translation</i>
NRCan	<i>National Resources Canada</i>
NTRIP	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>
PCV	<i>Phase Center Variations</i>
RAMSAC	<i>Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>
Rede GNSS SP	<i>Rede GPS Ativa do oeste do Estado de São Paulo</i>
REMOS	<i>Red de estaciones de Monitoreo Satelital GPS</i>
RGNA	<i>Red Geodésica Nacional Activa</i>
RIBaC	<i>Rede INCRA de bases Comunitárias do GPS</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
SAD69	<i>South American Datum 1969</i>
SAPOS	<i>Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung</i>
SGB	<i>Sistema Geodésico Brasileiro</i>
SIG	<i>Sistema de Informações Geográficas</i>
SINEX	<i>Solution INdependent EXchange</i>
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SIRGAS	<i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
SIRGAS-CON	<i>Rede de Operação Contínua SIRGAS</i>
SIRGAS-CON-C	<i>Densificação da rede ITRF na América Latina</i>
SIRGAS-CON-D	<i>Redes de Densificação SIRGAS</i>
SOFA	<i>Standards of Fundamental Astronomy</i>
SOPAC	<i>The Scripps Orbit and Permanent Array Center</i>
STEC	<i>Slant TEC</i>
TAI	<i>Tempo Atômico Internacional</i>

TDB	Tempo Dinâmico Baricêntrico
TIGA	<i>GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TEO	<i>Terrestrial Ephemeris Origin</i>
TGP	<i>Top ou Ground Plane</i>
TGPS	Tempo GPS
TEQC	<i>Translate, Edit, Quality Check</i>
TT	<i>Terrestrial Time</i>
TU	Tempo Universal
TS	Tempo Sideral
UCAR	<i>University Corporation for Atmospheric Research's</i>
UNAVCO	<i>University NAVSTAR Consortium</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinate</i>
VEMOS	<i>Velocity Model SIRGAS</i>
VMS	Modelo VEMOS2009
VLBI	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>
VMF	<i>Viena Mapping Function</i>
VTEC	Vertical TEC
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	22
1.2 OBJETIVOS .....	24
1.3 JUSTIFICATIVA .....	25
<b>2 REFERENCIAIS GEODÉSICOS E POSICIONAMENTO POR SATÉLITES .....</b>	<b>26</b>
2.1 SISTEMAS DE REFERÊNCIA CELESTE E TERRESTRE .....	26
2.2 RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS TERRESTRE E CELESTE .....	27
2.2.1 Precessão e Nutação .....	28
2.2.2 Rotação da Terra e Movimento do pólo .....	29
2.2.3 Transformações de acordo com a resolução da IAU 2000 .....	30
2.3 SISTEMAS DE TEMPO .....	33
2.4 ITRS .....	33
2.5 SIRGAS .....	36
2.6 WGS84 .....	37
2.7 SISTEMA DE REFERÊNCIA GEODÉSICO LOCAL .....	38
2.8 SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO .....	39
<b>3 ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO RELATIVO .....</b>	<b>46</b>
3.1 IONOSFERA .....	47
3.1.1 Modelagem dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera .....	51
3.2 TROPOSFERA .....	59
3.3 PERDAS DE CICLOS .....	67
3.4 MULTICAMINHO .....	68
3.5 Rotação da Terra e Movimento do pólo .....	69
3.6 Marés Terrestres .....	70
3.7 Carga dos oceanos .....	71
3.8 Carga da atmosfera .....	72
3.9 Centro de fase da antena do receptor .....	72
3.10 Rotação da fase .....	75
3.11 Erro do relógio do receptor .....	76
3.12 Atraso no hardware do receptor .....	76
3.13 Variação temporal das coordenadas devido à Geodinâmica .....	77
<b>4 INTEGRAÇÃO DE REDES .....</b>	<b>78</b>

4.1 PRINCÍPIO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS .....	80
4.2 Ajustamento pelo Método Paramétrico .....	80
4.2.1 Introdução de novas observações e parâmetros no ajustamento pelo método paramétrico .....	83
4.3 Modelos matemáticos envolvidos no processo de integração de redes geodésicas .....	85
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>97</b>
5.1 DADOS UTILIZADOS .....	97
5.2 SOFTWARES E APLICATIVOS .....	98
5.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS.....	99
5.4 INTEGRAÇÃO DAS REDES RBMC E GNSS SP À REDE SIRGAS-CON.....	102
<b>5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....</b>	<b>105</b>
5.1 CORREÇÃO DOS EFEITOS DE 2ª E 3ª ORDEM DA IONOSFERA.....	105
5.2 OBTENÇÃO E ANÁLISE DAS SOLUÇÕES INTEGRADAS .....	114
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>131</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE A – SÉRIES TEMPORAIS DA VARIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA DOS EFEITOS DE 2ª E 3ª NAS OBSERVÁVEIS GPS.....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE B – COORDENADAS DAS ESTAÇÕES SIRGAS PROCESSADAS NO PERÍODO DE 2006 A 2008 NA ÉPOCA DE REFERÊNCIA 2007,507. ....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE C – SOLUÇÃO SIR09P01 NA ÉPOCA DE REFERÊNCIA 2007,507.....</b>	<b>158</b>
<b>APÊNDICE D - SÉRIES TEMPORAIS DAS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES PROCESSADAS E INJUNCIÓNADAS NO SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL .</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICE E – VELOCIDADES DAS ESTAÇÕES SIRGAS.....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXO A – COEFICIENTES DO MODELO FES2004.....</b>	<b>173</b>
<b>ANEXO B – QUADRO COM A IDENTIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NO PERÍODO DE 2006 A 2008 NO PROCESSO DE INTEGRAÇÃO DAS SOLUÇÕES. ....</b>	<b>174</b>
<b>ANEXO C – COORDENADAS APROXIMADAS DAS ESTAÇÕES EM SIRGAS2000. ....</b>	<b>178</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A consistência, a acurácia e a confiabilidade dos sistemas de referência terrestres disponíveis atualmente são requeridas para a mensuração e mapeamento da Terra, bem como aos estudos relacionados com suas variações temporais. Esses critérios servem de base a inúmeras aplicações práticas, desde o estabelecimento de redes globais e regionais, engenharia, navegação de precisão, sistemas de geo-informação, bem como às investigações científicas como no monitoramento do movimento das placas litosféricas, variações do nível médio dos mares, movimento do eixo de rotação da Terra e sua respectiva velocidade de rotação, órbitas dos satélites artificiais, entre outras.

Atualmente, as técnicas geodésicas espaciais permitem a obtenção de parâmetros geodésicos como, por exemplo, posição das estações, rotação e velocidade da Terra, com precisão milimétrica. Contudo, isso não reflete a acurácia das atuais realizações dos sistemas de referência terrestres, em virtude da deficiência inerente a cada técnica espacial utilizada em suas realizações, como também da metodologia empregada na combinação destas soluções espaciais.

O progresso alcançado em pesquisas nas mais diversas geociências, de acordo com o *Integrated Global Geodetic Observing System* (IGGOS) da *International Association of Geodesy* (IAG), implica em considerar a Terra um sistema, no qual serão associadas informações de natureza geométrica, gravitacionais, entre outras, por meio da integração de diferentes técnicas espaciais de observação como *Global Navigation Satellite System* (GNSS); *Satellite Laser Ranging* (SLR), *Lunar Laser Ranging* (LLR), *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), *Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite* (DORIS) e satélites altimétricos como GRACE, Jason1, GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*), além de futuras missões espaciais, os quais vêm contribuindo com a manutenção e a densificação de redes regionais e globais e na realização de sistemas geodésicos de alta precisão (ROTACHER, 2002).

Neste contexto destaca-se o ITRS (*International Terrestrial Reference System*), referencial geodésico mais preciso atualmente, cuja realização denominada ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) tem sido concretizada mediante a combinação das técnicas espaciais como VLBI, DORIS, GNSS, SLR/LLR, sob responsabilidade do escritório central do IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*), com base em dados fornecidos por Centros de Análise distribuídos mundialmente no formato

*Solution INdependent EXchange* (SINEX) e sob a coordenação de três centros de combinação ITRS: *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut* (DGFI), *Institute Géographique National* (IGN) e *National Resources Canada* (NRCan), contribuindo para novas realizações ITRS, bem como à comunidade geodésica nacional e internacional. Nestas soluções, a origem do sistema é fornecida, principalmente, pela técnica SLR, bem como pelo GPS (*Global Positioning System*) e DORIS. A escala é fornecida por dados coletados de VLBI, mas pode ser determinada por técnicas SLR e GPS. A orientação, por sua vez, não pode ser obtida por nenhum sistema de medição.

Explorar a potencialidade das técnicas geodésicas espaciais para a investigação de variações globais ou regionais, fenômenos sazonais ou seculares, requer que estes referenciais sejam realizados com uma alta acurácia, consistência espacial e temporal e estabilidade ao longo de muitas décadas. Assim, Centros de Análise e Processamento devem utilizar padrões adotados internacionalmente como: convenções IERS2003, procedimento para estimar o movimento do pólo e sua taxa de variação; modelo de correção absoluta das variações do centro de fase da antena; modelo orbital; modelagem do atraso zenital troposférico com base em funções de mapeamento derivadas de modelos de previsão numérica do tempo; correções dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera; influências das cargas oceânicas e dos DCB (*Differential Code Biases*), entre outros (STEINGENBERGER et al., 2006).

No que se refere a um sistema regional, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) vem disponibilizando soluções semanais no formato SINEX, referenciadas ao ITRS, das estações da rede SIRGAS-CON (Rede de Operação Contínua SIRGAS), densificação da rede ITRF na América Latina, com base em dados processados por centros locais de processamentos como o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o *Instituto Geográfico Agustín Codazzi* (IGAC, Colômbia) e o *Centro de Procesamiento Ingeniería-Mendoza-Argentina de la Universidad Nacional del Cuyo* (CIMA, Argentina), que caracterizam as redes de densificação SIRGAS (SIRGAS-CON-D), respectivamente, na América Central, Norte e Sul. Essas soluções são, posteriormente, combinadas pelo DGFI, Centro de Análise Regional IGS (*International GNSS Service*) denominados IGS- RNAAC- SIR (*Regional Network Associate Analysis Center for SIRGAS*), responsáveis por processar a rede regional SIRGAS-CON-C (Rede de Operação Contínua SIRGAS), (SIRGAS, 2009).

No Brasil, o IBGE vem gerando desde 2003 arquivos SINEX por meio de dados coletados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e de algumas estações SIRGAS, os quais são submetidos, posteriormente, ao DGFI e integrados à solução regional,



contribuindo com a manutenção e o estabelecimento da rede geodésica mundial. Em seus processamentos, o IBGE utiliza estações que também pertencem à rede IGS, as quais fazem parte da definição do sistema geodésico de referência e são introduzidas como injunções no ajustamento, como as estações BRAZ (Brasil), LPGS (Argentina), SANT (Chile) e RIOG (Argentina) (desativada e substituída pela estação UNSA, também na Argentina), (COSTA, SILVA e LAGO, 2007).

Com base nessa exposição, verifica-se que a participação de organizações responsáveis por atividades que contemplam ciência, tecnologia, processamento e análises de dados de diversos centros, bem como o desenvolvimento de produtos, é de essencial contribuição ao desenvolvimento de pesquisas nas mais diversas áreas das Geociências e, em especial, em um país de extensão continental como o Brasil, fato este que culminou no desenvolvimento desta dissertação.

## 1.2 Objetivos

Este projeto tem por finalidade propor uma metodologia de integração de redes locais no contexto de uma solução regional para o Brasil, que forneça a manutenção e densificação do SIRGAS na América do Sul, com base em processamentos contínuos das estações GPS pertencentes às redes ativas RBMC e a Rede GNSS SP (Rede GPS Ativa do oeste do Estado de São Paulo), com o intuito de monitorar a variação temporal das coordenadas destas estações, bem como a qualidade dos dados disponibilizados para a densificação desta rede.

Como objetivos específicos comparecem os seguintes:

- Processar dados GPS de estações pertencentes às redes de natureza local, com o *software* Bernese, onde algumas dessas estações devem ser comuns à rede regional, uma vez que será com base no número de estações comuns entre as redes que se dará o processo de integração;
- Integrar as soluções locais à rede de natureza regional, com base na combinação das equações normais da solução local, obtidas com o processamento dos dados GPS, com as soluções regionais no formato SINEX, utilizando-se o módulo ADDNEQ2 do Bernese;
- Produzir soluções semanais livres (equações normais e arquivos SINEX), com base nas soluções integradas, e gerar soluções multi-anuais, com base nas quais se estimará as coordenadas e velocidades das estações;

- Produzir soluções semanais fixas (coordenadas), a partir das soluções integradas e gerar séries temporais das coordenadas e velocidades das estações envolvidas no processo de integração;
- Comparar os resultados obtidos com a mais recente solução SIRGAS (SIR09P01), época de referência 2005,0, por meio de estações comuns a ambas as redes.

### **1.3 Justificativa**

As estações da RBMC e da Rede GNSS SP coletam e disponibilizam dados GPS, os quais podem ser processados juntamente com as soluções da rede SIRGAS, a partir dos arquivos SINEX, utilizando o princípio de combinação de equações normais, contribuindo à manutenção e densificação da rede SIRGAS e ao desenvolvimento de pesquisas em território nacional, com soluções que poderão ser mais consistentes e homogêneas. Desta forma, esta pesquisa se justifica por buscar estabelecer uma metodologia de integração entre redes GNSS de concepções distintas, com base em convenções adotadas internacionalmente, que visam à correção dos principais efeitos que afetam o posicionamento por satélite, como também, por explorar a potencialidade de *softwares* científicos no processamento de redes geodésicas de alta precisão.

## 2 REFERENCIAIS GEODÉSICOS E POSICIONAMENTO POR SATÉLITES

Um Sistema Geodésico de Referência (*Geodetic Reference System - GRS*) é um sistema de coordenadas associado a algumas características terrestres, cujo projeto de concepção envolve as etapas de definição, materialização e densificação. A definição, em inglês *reference system*, compreende a idéia conceitual envolvendo modelos matemáticos e físicos, com a adoção de um elipsóide de revolução, sobre o qual são aplicadas injunções de posição e orientação espacial. A materialização ou realização, em inglês *reference frame*, constitui um conjunto de estações geodésicas com suas respectivas coordenadas, velocidades e precisões, enquanto que a densificação compõem as redes de referência continentais, nacionais ou regionais (McCARTHY, 1996).

Neste contexto, torna-se necessária a definição de um sistema quase-inercial ou Newtoniano, que se move com o centro de massa da Terra, mas é livre de rotação, para descrever a equação do movimento para a órbita dos satélites. Por outro lado, a observação desses satélites e de suas transmissões é realizada normalmente na superfície da Terra em rotação (McCARTHY, 1996).

Para comparar medidas terrestres (sistema em rotação) com a posição computada para o satélite (sistema inercial), é necessária uma definição clara de sistemas de referência terrestre e celeste, bem como a relação entre estes dois sistemas (McCARTHY, 1996).

### 2.1 Sistemas de Referência Celeste e Terrestre

Em 1991 a IAU (*International Astronomical Union*) decidiu que o Sistema de Referência Celeste Convencional (CCRS – *Conventional Celestial Reference System*) seria realizado por um catálogo de coordenadas equatoriais ou uranográficas (ascensão da reta e declinação) de fontes extragalácticas quasares (*Quasar – Quase Estelar Radio Source*), com base em observações VLBI calculadas na época de referência J2000 (primeiro de janeiro de 2000 ou dia Juliano 2451545,0), cujos movimentos próprios são considerados desprezíveis, quando comparados com a acurácia das medidas realizadas sobre os mesmos (McCARTHY, 1996).

No CCRS, a origem é definida pelo baricentro solar e as direções dos eixos são fixas em relação aos quasares na época JD2000, de forma que o eixo  $X^C$  aponta para o equinócio vernal médio às 12 horas TDB (Tempo Dinâmico Baricêntrico) do dia primeiro de janeiro de 2000 (época de referência J2000). O eixo  $Z^C$  aponta na direção do pólo norte celeste médio

na época de referência J2000 e o eixo  $Y^C$  completa o sistema dextrógiro (McCARTHY, 1996; MONICO, 2000).

O Sistema de Referência Terrestre Convencional (CTRS – *Conventional Terrestrial Reference System*), por sua vez, é um sistema fixo a Terra, ou seja, rotaciona com ela. É geocêntrico e o centro de massa é definido pela inclusão dos oceanos e da atmosfera. Sua orientação é dada pelo BIH (*Bureau International de l'Heure*), na época 1984,0. A escala corresponde à de um sistema de referência terrestre e está diretamente relacionada com a referência de tempo utilizada (MONICO, 2000). Para a determinação das órbitas dos satélites com alta precisão, os efeitos relativistas devem ser considerados (CARARO, 2006).

O eixo Z aponta na direção do pólo terrestre convencional (CTP – *Conventional Terrestrial Pole*), o eixo X aponta na direção média do meridiano de Greenwich e o eixo Y completa o sistema dextrogiro. A realização do CTRS é composta por um catálogo de coordenadas e velocidades de um grupo de estações IERS e é denominada ITRF-yy, em que yy referem-se aos dois últimos dígitos do ano cujos dados contribuíram para a realização em questão. Essas estações têm sido levantadas por diferentes técnicas geodésicas espaciais como VLBI, SLR, GPS e DORIS com o intuito de minimizar a deficiência inerente a cada técnica (McCARTHY, 1996; MONICO, 2000).

## 2.2 Relação entre os sistemas terrestre e celeste

A transformação entre o CCRS e o CTRS se dá por meio de uma seqüência de rotações em que se considera a Precessão, Nutação, rotação e orientação da Terra, incluindo o movimento do pólo (MONICO, 2005).

Na transformação do Sistema de Referência Baricêntrico (BRS – *Barycentric Reference System*) para o GRS, devem ser considerados, ainda, efeitos referentes à aberração, paralaxe anual, curvatura da luz e mudança de sistema de tempo (MONICO, 2005).

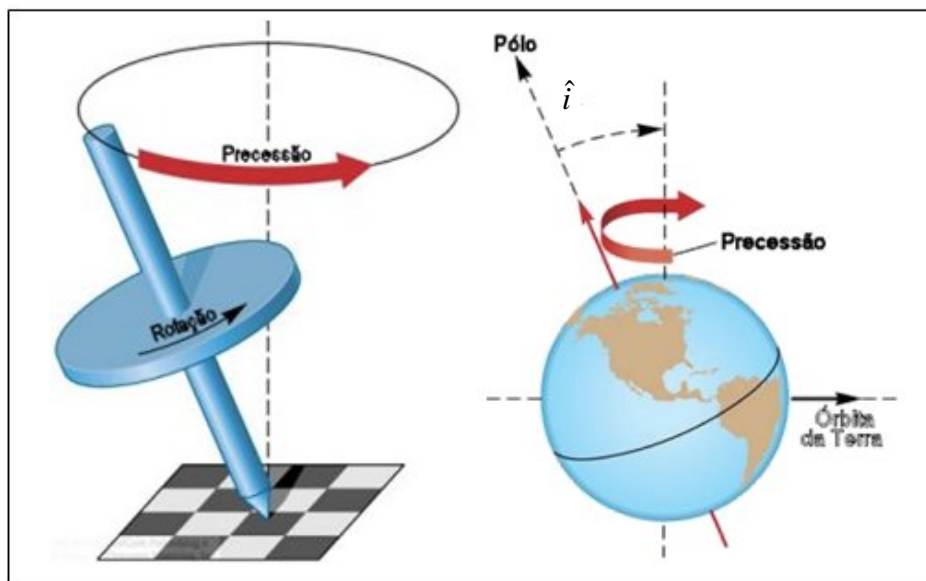
Os movimentos de Precessão e Nutação são efeitos resultantes da atração gravitacional do Sol e da Lua sobre a protuberância equatorial da Terra, o que implica que o movimento total resultante possa ser decomposto em uma componente principal secular (Precessão) e em uma componente secundária periódica (Nutação), (McCARTHY e PETIT, 2004). Em razão destes movimentos, o eixo de rotação da Terra e seu plano equatorial não estão fixos no espaço, mas rotacionam em relação a um sistema inercial, como o CCRS. Quando somente o efeito da Precessão é considerado, o equador e o ponto vernal são denominados equador médio e ponto vernal médio e tem-se neste caso o sistema celeste de referência médio. Contudo, quando somente o efeito da Nutação é considerado, tem-se o

equador e o ponto vernal verdadeiros, correspondendo ao sistema de referência celeste verdadeiro (McCARTHY e PETIT, 2004).

O movimento do pólo é a rotação do pólo celeste verdadeiro em relação ao pólo de um sistema de referência convencional fixo a Terra. Isso ocorre em virtude das propriedades elásticas da Terra e da sua interação com a atmosfera (SEEBER, 2003). Os parâmetros de orientação da Terra são deste modo determinados empiricamente, o que tem sido realizado pelo IERS, mediante observações geodésicas espaciais de longo período efetuadas por diversas tecnologias (VLBI, SLR, DORIS e GPS). Uma descrição mais detalhada das matrizes de transformação entre os sistemas celeste e terrestre pode ser encontrada em Seeber (2003).

### 2.2.1 Precessão e Nutação

O planeta Terra não é perfeitamente esférico, sendo achatado nos pólos e bojudo na região equatorial (o diâmetro equatorial é cerca de 40 km maior do que o diâmetro polar). Além disso, o plano do equador terrestre e, portanto, o plano do bojo equatorial apresenta uma inclinação ( $\hat{i}$ ) de  $23^{\circ}26'21,412''$  em relação ao plano da eclíptica que, por sua vez, está inclinado  $5^{\circ}11'$  em relação ao plano da órbita da Lua (TORGE, 2001), como ilustra a Figura 1.



**Figura 1** - Causa do movimento de Precessão da Terra.

**Fonte:** Oliveira Filho e Saraiva (2007).

Em função deste movimento, as forças diferenciais tendem não apenas a achatar ainda mais a Terra, como também a alinhar o eixo de rotação da Terra ao eixo da eclíptica. Desta forma, estando a Terra em seu movimento de rotação, o seu eixo não se encontra alinhado ao da eclíptica, pressionando-se em torno deste de forma similar a um pião, que posto a girar se precessiona em torno do eixo vertical em relação ao solo (VANÍČEK e KRAKIWSKY, 1986).

No caso da Terra, as forças gravitacionais do Sol e da Lua produzem um torque que tende a alinhar o eixo de rotação da Terra com o eixo da eclíptica. Todavia, como esse torque é perpendicular ao momento angular de rotação da Terra, seu efeito é mudar a direção do eixo de rotação, sem para tanto alterar sua inclinação. Portanto, os pólos celestes não ocupam uma posição fixa no espaço, ou seja, cada pólo celeste se move lentamente em torno do respectivo pólo da eclíptica, descrevendo uma circunferência em torno dele com raio de  $23,5^{\circ}$  (VANÍČEK e KRAKIWSKY, 1986).

O movimento de Precessão da Terra é conhecido como Precessão dos equinócios, porque devido a este movimento os equinócios (ponto vernal e ponto outonal) se deslocam ao longo da eclíptica no sentido de ir ao encontro do Sol (retrógrado em relação ao movimento da Terra em torno do Sol), de  $18^{\circ}18'$  a  $28^{\circ}36'$ , (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2007). A variação da direção do eixo da Terra é de, aproximadamente,  $50''$  de arco por ano ou  $360^{\circ}$  em cerca de 26000 anos. Esse fenômeno não se realiza uniformemente, mas sofre oscilações periódicas denominadas Nutação (VANÍČEK e KRAKIWSKY, 1986).

A Nutação, trata-se da componente não circular (bamboleio) do movimento do pólo da Terra em torno do pólo da eclíptica, causada pelas variações na inclinação da órbita da Lua em relação à órbita da Terra em torno do sol. A principal contribuição da Nutação na obliquidade da Terra tem uma amplitude de  $9,21''$  e período de, aproximadamente, 18,6 anos, porém têm-se ainda contribuições menores como  $0,57''$  com períodos de 182,62 dias (VANÍČEK e KRAKIWSKY, 1986).

### **2.2.2 Rotação da Terra e Movimento do pólo**

Após a eliminação, via transformação, das influências externas à Terra (Precessão e Nutação), deve-se considerar ainda a rotação do eixo da Terra, bem como suas propriedades elásticas e interação com a atmosfera (MONICO, 2005).

O movimento de rotação se dá em torno do eixo imaginário da Terra, inclinado  $66,5^{\circ}$  em relação ao plano da eclíptica, que passa pelos pólos norte e sul geográficos. O período de

rotação é de 23h 56min 04s (dia sideral – período de rotação da Terra em torno do seu eixo), cerca de 3min 56s mais curto que o período correspondente a 1 dia solar (24h 00min 00s), período de rotação da Terra em torno do Sol (MONICO, 2005).

Considerando-se que a Terra apresenta apenas o movimento de rotação, o seu período de rotação coincidiria com a duração do dia solar, o que implica que o movimento de rotação seja responsável pela duração do dia e da noite.

O movimento do pólo, por sua vez, refere-se ao movimento de rotação do pólo celeste verdadeiro (eixo de rotação instantâneo) em relação CTP. Isso ocorre em virtude da Terra não ser um corpo rígido, o que implica que esteja sujeita às deformações elásticas, ou seja, o corpo da Terra sofre um deslocamento em relação ao eixo de rotação (MONICO, 2005).

Os parâmetros de orientação da Terra (EOP - *Earth Orientation Parameters*), por sua vez, são determinados por meio de observações. Assim, a transformação do sistema CCRS para o CTRS requer parâmetros adicionais, que fazem parte dos EOP como o tempo sideral verdadeiro de Greenwich (GST - *Greenwich Sideral Time*) e as coordenadas do pólo  $(x_p, y_p)$ , (MONICO, 2005).

Este deslocamento não exerce nenhuma influência sobre o eixo de rotação da Terra, cuja direção se mantém fixa no espaço e, por isso, existem vários pontos na superfície terrestre que coincidem, em instantes diferentes, com os pólos de rotação. Como consequência disso, as latitudes dos lugares sobre a superfície terrestre variam, desviando até 0,3" de arco do seu valor médio. Para mais detalhes consultar o endereço: <<http://www.sab-astro.org.br/cesab/newhtml/TerLua.html>>, acessado em março/08.

### 2.2.3 Transformações de acordo com a resolução da IAU 2000

Atualmente, na transformação entre referenciais CCRS e CTRS recomenda-se a resolução IAU 2000, na qual se dá a substituição dos modelos até então utilizados (IAU 1976 para Precessão e IAU 1980 para a Nutação) pelos modelos da IAU 2000A, podendo ser também utilizada a IAU 2000B, dependendo da precisão requerida (MONICO, 2004). Segundo McCarthy e Petit (2004), enquanto o primeiro referencial proporciona precisão da ordem de 0,2 *mas* (mili arcos de segundos), no segundo esse valor aumenta para 1,0 *mas*.

Nesta perspectiva, ao realizar as transformações de Precessão e Nutação, se obtém um sistema de coordenadas celestes intermediário (CIP – *Celestial Intermediate Pole*), em substituição ao CEP (*Celestial Ephemeris Pole*). De acordo com Monico (2005), a direção do

CIP na época J2000 tem que ser corrigida em relação ao pólo do CGRS (*Celestial Geocentric Reference System*) de forma consistente com o novo modelo de Precessão e Nutação. Enquanto que o movimento do CIP no CGRS (Precessão e Nutação) é realizado por meio de modelos citados para períodos maiores que dois dias, acrescido de correções dependentes do tempo, que serão proporcionadas pelo IERS, em função de observações astro-geodésicas.

Desta forma, para realizar a transformação de forma compatível com a nova resolução (IAU 2000), com base em Equações baseadas nos modelos IAU 1976 de Precessão e IAU 1980 para a Nutação, devem-se aplicar os conceitos já descritos na literatura e que são específicos para esta transformação, bem como correções ao modelo. De acordo com Monico (2005), a acurácia ficará restrita ao modelo IAU 2000B de Precessão e Nutação.

Ainda de acordo com Monico (2005), a transformação de um sistema celeste  $(X^C, Y^C, Z^C)$  para o terrestre  $(X^T, Y^T, Z^T)$ , segundo o novo conceito é dada por:

$$\vec{X}^T = W(t)R(t)Q(t)\vec{X}^C \quad (1)$$

onde  $W(t)$ ,  $R(t)$  e  $Q(t)$  representam, respectivamente, as matrizes de rotação resultante do movimento do pólo, ângulo de rotação da Terra e do movimento do pólo celeste no sistema celeste (Precessão e Nutação).

A matriz  $W(t)$  é obtida por:

$$W(t) = R_3(s')R_2(-x_p)R_1(-y_p) \quad (2)$$

com  $x_p$  e  $y_p$  sendo as coordenadas do pólo e  $(s')$  uma quantidade, em unidades de microssegundos de arco (*uas*), que proporciona a posição a origem das efemérides (TEO - *Terrestrial Ephemeris Origin*) no ITRS. Essa quantidade pode ser obtida pela Equação:

$$s' = -47t \quad (3)$$

O parâmetro  $t$  é definido por:

$$t = (TT - 2451545,0) / 3625,0 \quad (4)$$

onde TT representa tempo terrestre, sendo:

$$TT = TAI + 32,184s = TGPS + 19s + 32,184s \quad (5)$$



sendo *TAI* o Tempo Atômico Internacional e *TGPS* o tempo GPS. A matriz  $R(t)$  é obtida em função do ângulo de rotação da Terra  $\theta(t)$ , sendo do tipo  $R_3$ . O ângulo é medido sobre o equador do CIP, entre o CEO (*Celestial Ephemeris Origin*) e o TEO. O ângulo de rotação da Terra é obtido a partir de sua relação linear com o UT1:

$$\theta(Tu) = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448.Tu) \quad (6)$$

com  $Tu = (\text{Data Juliana em UT1} - 2451545,0)$ . Os termos CEO e TEO, de acordo com a resolução B1.8 e IAU 2000, referem-se a origens não sujeitas à rotação no CGRS e ITRS respectivamente. Ressalta-se que  $UT1 = UTC + DUT1$ , com  $UTC = TAI - \text{número de saltos de segundos}$ , e UTC (*Universal Time Coordinate*) representa o Tempo Universal Coordenado. O termo DUT1 é fornecido pelo IERS juntamente com os elementos do movimento do pólo (MONICO, 2005).

A matriz  $Q(t)$  é obtida pela seguinte Equação:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - ax^2 & -axy & x \\ -axy & 1 - ay^2 & y \\ -x & -y & 1 - a(x^2 + y^2) \end{bmatrix} R_3(s) \quad (7)$$

com  $a = 1/2 + 1/8(x^2 + y^2)$ . As coordenadas  $x$  e  $y$  correspondem à posição do CIP no CGRS, baseadas nos modelos IAU 2000A ou IAU 2000B. A quantidade  $s$  (Equação 7) proporciona a posição CEO no equador do CIP.

Todavia, análises das observações VLBI têm mostrado que ainda ocorrem deficiências no novo modelo, o que conduz à necessidade de correções como, por exemplo, as a utilização das variações das coordenadas pólo celeste (*Celestial Pole Offset*), são disponibilizadas pelo IERS em seus boletins.

Ressalta-se, ainda, que o IERS disponibiliza o código de rotinas em linguagem Fortran, que permitem implementar a resolução IAU 2000. Essas rotinas estão disponíveis no endereço: <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000/chapter5>. Além disso, rotinas adicionais são necessárias ao processo de implementação e encontram-se disponíveis em <http://www.iausofa.rl.ac.uk>, rotinas estas que compõem o SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*). Nesse endereço encontra-se, ainda, a implementação dos modelos IAU 2000 (MONICO, 2005).

### 2.3 Sistemas de tempo

Segundo Bock (1996), existem três conceitos associados aos sistemas de tempo: instante, que representa quando determinado evento ocorreu; época, instante de ocorrência de um evento que será tomado como origem da contagem de tempo e, finalmente, o intervalo, que se refere ao tempo decorrido entre duas épocas, medidas em uma mesma escala de tempo.

Segundo Monico (2005), no posicionamento por satélites três escalas de tempo são necessárias: o tempo atômico, o tempo dinâmico e o tempo baseado na rotação da Terra (sideral e universal), uma vez que o GPS registra o instante da tomada de suas medidas em tempo atômico enquanto que as equações do movimento de seus satélites são expressas em tempo dinâmico.

As escalas de tempo anteriores ao tempo atômico baseavam-se somente no movimento de rotação da Terra com respeito ao Sol médio ou a esfera celeste denominados, respectivamente, de tempo universal (*TU*) e sideral (*TS*) (SEEBER, 2003). Tais terminologias ainda são consideradas, pois a rotação primária entre o CCRS e o CTRS pode ser realizada em função do SOFA e, além disso, as variações da rotação da Terra são descritas pelas diferenças entre o tempo universal e o tempo atômico (MONICO, 2005).

### 2.4 ITRS

O ITRS é um sistema de referência espacial que rotaciona com a Terra em seu movimento no espaço. Tem origem geocêntrica e orientação equatorial (o eixo Z aponta na direção do pólo) (MONICO, 2005). De acordo com a resolução da N° 2 da IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics* – Associação Internacional de Geodésia e Geofísica), adotada em Viena em 1991, este sistema deve atender às seguintes definições (McCARTHY e PETIT, 2004; McCARTHY, 1996; MONICO, 2005):

- origem geocêntrica, o que contempla o centro de massa da Terra, oceanos e atmosfera;
- escala consistente com o TCG para um dado referencial geocêntrico;
- orientação inicial definida pelo BIH na época 1984,0;
- evolução temporal da orientação assegurada pela condição NNR (*No Net Rotation*) em relação ao movimento tectônico horizontal sobre a Terra.

A definição do ITRS compreende o modelo geométrico GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*) cujos parâmetros definidores são:

**Tabela 1** - Parâmetros definidores do GRS80

Parâmetros	Abrev.	GRS80
Semi-eixo maior (m)	$a$	6378137
Achatamento	$1/f$	1/298,257222101
Velocidade Angular (rad/s x $10^{-11}$ )	$\omega$	7292115,0
Constante Gravitacional Geocêntrica ( $m^3 / s^2 \times 10^8$ )	$GM$	0,3986004418
Esferopotencial ( $Gal.m \times 10^3 = 1u.g.p = 10m^2 / s^2$ )	$U_0$	6263686,1
Coefficiente Harmônico do Segundo Grau	$J_2$	$108263 \times 10^{-8}$

A materialização do ITRS é atualizada continuamente, em razão da variação temporal das coordenadas. A variação de coordenadas de uma estação ITRF é caracterizada pelas coordenadas  $X, Y, Z$  (geocêntricas) com suas respectivas velocidades, isto é,  $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ , numa determinada época  $t$  de referência  $t_0$ . Desta forma, por meio dos vetores  $\vec{X} = X, Y, Z$  e  $\vec{V} = \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$  pode-se expressar a posição de um ponto na superfície terrestre para uma época  $t$  da seguinte forma:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0(t-t_0) + \vec{V}_0(t-t_0) + \sum_i \Delta \vec{X}_i(t) \quad (8)$$

onde  $\Delta \vec{X}_i$ , são correções em função dos vários efeitos que alteram com o tempo e  $\vec{X}_0$  e  $\vec{V}_0$  são, respectivamente, a posição e a velocidade na época de referência  $t_0$  e, além disso, deve-se considerar correções quanto ao deslocamento de maré da Terra sólida, carga dos oceanos e carga da atmosfera (MONICO, 2000).

As realizações do ITRS ficam a cargo do escritório central do IERS, e sua mais recente realização é denominada ITRF2005. Diferentemente das realizações anteriores, na ITRF2005 utilizou-se como dados de entrada as séries temporais das posições das estações e dos EOP (MONICO, 2008). Na definição do *datum* do ITRF2005, a origem foi definida de tal forma que os parâmetros de translação, na época de referência 2000,0 sejam nulos, em relação às séries temporais do SLR/LLR (ITRF, 2009).

No que concerne a escala, esta foi definida de forma que o fator de escala seja nulo para a época 2000,0, em relação às séries temporais do IVS (*International VLBI Service for*

*Geodesy and Astronomy*). A orientação, por sua vez, foi estabelecida de maneira que os parâmetros de rotação e suas respectivas taxas de variação sejam, na época 2000,0, nulos entre o ITRF2005 e ITRF2000 época 1997,00, (ITRF, 2009). Na transformação entre as realizações ITRF2000 e ITRF2005 é empregada a transformada de Helmert generalizada, que utiliza 14 parâmetros de transformação: 3 translações, 3 rotações, 1 fator de escala e suas respectivas taxas de variação. Estes parâmetros encontram-se disponíveis no endereço: [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/tp\\_05-00.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php) e são apresentados na Tabela 2:

**Tabela 2** - Parâmetros de transformação entre as realizações ITRF2005 e ITRF2000.

Translação (mm/ano)			Rotação (mas) <sup>*</sup>			Fator de escala (10 <sup>-9</sup> )
$T_x$	$T_y$	$T_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$s$
0,1	-0,8	-5,8	0,0	0,0	0,0	0,4
$\dot{T}_x$	$\dot{T}_y$	$\dot{T}_z$	$\dot{R}_x$	$\dot{R}_y$	$\dot{R}_z$	$\dot{s}$
-0,2	0,1	-1,8	0,0	0,0	0,0	0,08

(<sup>\*</sup> milissegundos de arco).

Segundo Altamini et al. (2007), estima-se que as discrepâncias entre as realizações ITRF2005 (época 2000,0) e a ITRF2000 (época 1997,0) são de, respectivamente, de 0,1 mm; 0,8 mm e 5,8 mm para as componentes X, Y e Z com taxas de variação de 0,2 mm/ano; 0,1 mm/ano e 1,8 mm/ano, respectivamente, o que induz a uma taxa de deformação da velocidade (taxa de escala) na ordem de 0,1 ppb. Tais inconsistências são decorrentes às deficiências inerentes às deficiências de cada técnica de posicionamento espacial.

As séries temporais das posições das estações e parâmetros de orientação da Terra (EOP) são disponibilizadas, de forma rotineira, em amostragens semanais baseadas em técnicas de posicionamento por satélites (SLR, GPS e DORIS) e em amostragens diárias a partir do VLBI. Estes dados permitem não só uma avaliação apropriada da exatidão e consistência interna do referencial como também se revelam, particularmente, adequados para medir o desempenho no posicionamento destas técnicas geodésicas espaciais (ALTAMIMI et al., 2002).

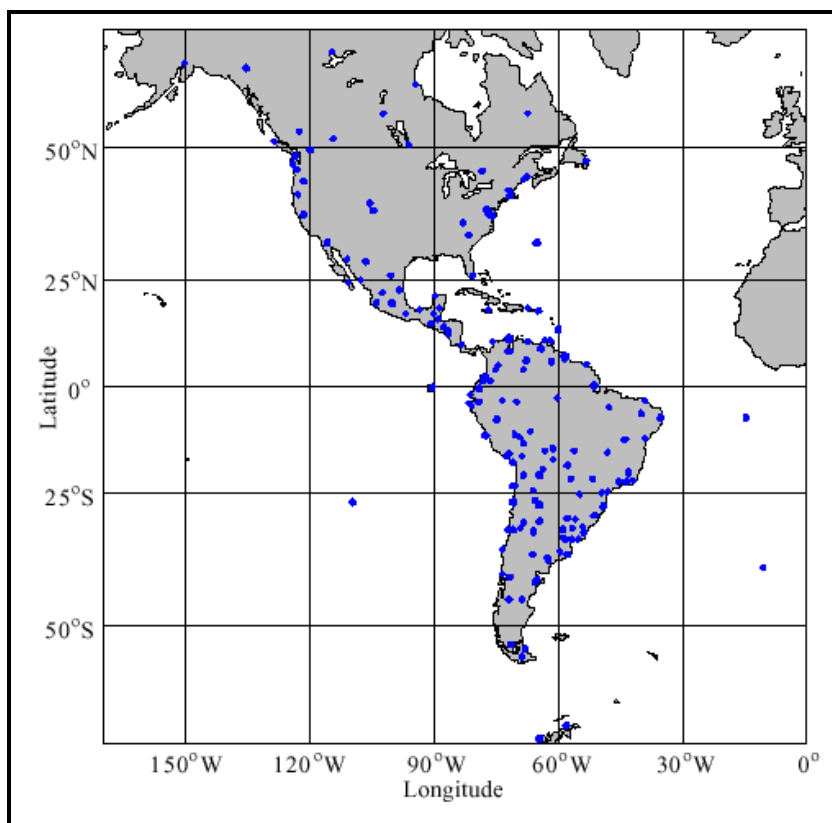
## 2.5 SIRGAS

O projeto original SIRGAS visava a definição, materialização e manutenção de um Sistema de Referência Geocêntrico tridimensional para a América do Sul, compatível a sistemas de referência adotados internacionalmente. Nesta perspectiva, estabeleceu-se, durante a Conferência Internacional realizada em Assunção, Paraguai, em 1993, os seguintes objetivos iniciais: materialização do ITRF94 na América do Sul, por meio de estações GPS comuns a ambas as redes, contribuindo à vinculação desta à rede internacional ITRF e, ainda, modelo geométrico geocêntrico, cujos eixos coordenados baseiam-se no ITRS e nos parâmetros do elipsóide GRS80.

A primeira realização ocorreu através de uma campanha GPS no período de 26 de maio a 4 de junho de 1995, referida ao ITRF94 (época 1995,4) e possui 58 estações distribuídas na América do Sul, das quais 31 participaram da campanha ITRF2000.

Em 1999, durante a 22<sup>a</sup> Assembléia Geral da União Geodésica e Geofísica Internacional, realizada em Birmingham, Inglaterra, foi planejada a realização da campanha SIRGAS2000, com o intuito de contemplar também a componente altimétrica do sistema (IBGE, 2002).

Na realização SIRGAS2000 (época 2000,4), a campanha ocorreu no período de 10 a 19 de maio de 2000, cujo objetivo era a definição de um Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. Nesta campanha, foram utilizadas as estações da campanha de 1995, as estações próximas aos marégrafos, que definem o referencial vertical em cada país, bem como estações próximas às fronteiras entre os países, em um total 184 estações ocupadas, como ilustra Figura 2.



**Figura 2 - Campanha GPS SIRGAS2000.**

**Fonte: IBGE (2003).**

As coordenadas desta realização não apresentam as estimativas de suas velocidades, podendo ser obtidas no endereço [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org). A adoção de um sistema geocêntrico, baseado no ITRF, permite a atualização temporal das coordenadas das estações SIRGAS, estabelecendo uma estrutura geodésica moderna, com precisão compatível com as das técnicas de posicionamento espacial utilizadas na atualidade (IBGE, 2003).

## 2.6 WGS84

O WGS84 (*World Geodetic System 1984*) refere-se ao sistema de referência geodésico utilizado pelo GPS e que foi desenvolvido, inicialmente, para fins militares pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (*U. S. Department of Defense - DoD*).

Em sua primeira realização, o sistema fornecia precisão métrica, em razão da limitação fornecida por observações Doppler realizadas pelo sistema TRANSIT (SEEBER, 2003). Visando melhor a precisão fornecida pelo sistema GPS foram realizadas três novas realizações: WGS 84 (G730), WGS 84 (G873) e WGS 84 (G1150), em que a letra “G” indica o uso da técnica GPS seguida pelo número da semana GPS em se ocorreu à realização (MONICO, 2000).

A definição do WGS 84, por sua vez, é a mesma do ITRS, exceto no que diz respeito ao modelo de maré gravimétrica, que considera o efeito da maré permanente, o que conduz a uma ligeira diferença no achatamento de  $(1/f = 298,257223563)$ . Desta forma, em termos práticos, ao se utilizar os dados coletados diretamente pelos receptores GPS, ou seja, as efemérides transmitidas, os dados obtidos estarão referidos ao WGS84. Em contrapartida, ao se utilizar efemérides precisas os dados obtidos estarão referenciados a uma das realizações do ITRF, definida nas efemérides.

## 2.7 Sistema de Referência Geodésico Local

Na perspectiva de se avaliar a variação das coordenadas de estações localizadas em uma mesma placa litosférica torna-se indispensável a representação do campo de velocidade destas estações com relação a um referencial local, onde cada ponto pode ser expresso em termo de suas coordenadas tridimensionais locais.

O sistema de coordenadas local é definido em função de uma normal ao elipsóide e consiste de um sistema cartesiano composto por três eixos mutuamente ortogonais, cujas direções nem sempre obedecem à definição convencional. Porém, para uma análise mais adequada dos vetores velocidade das estações, torna-se necessário analisá-las em termos de suas coordenadas locais nas direções norte ( $u$ ), leste ( $v$ ) e da normal para cima ( $w$ ), o que implica na necessidade de converter as coordenadas cartesianas de um ponto em termos de suas coordenadas locais (MONICO, 2005).

Um sistema geodésico local é definido como:

- Origem: um ponto  $P$  qualquer expresso em função de suas coordenadas curvilíneas  $(\varphi, \lambda, h)$  referenciadas a um dado elipsóide de referência;
- Eixo  $w$  alinhado à normal ao ponto  $P$  (origem do sistema), ponto onde se localiza o observador;
- Eixo  $u$ : aponta para a direção Norte, definida pelo meridiano geodésico do observador;
- Eixo  $v$ : aponta para Leste, sendo ortogonal aos outros dois eixos, caracterizando um sistema levógiro.

Segundo Soler e Hothem (1988), a transformação de coordenadas cartesianas em coordenadas locais é dada pela seguinte Equação:

$$\begin{bmatrix} u_Q \\ v_Q \\ w_Q \end{bmatrix} = P_2 R_2 (90^0 - \phi_P) R_3 (\lambda_P - 180^0) \begin{bmatrix} \Delta X_{QP} \\ \Delta Y_{QP} \\ \Delta Z_{QP} \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde:

$\phi_P, \lambda_P$  - coordenadas do ponto origem  $P$  ;

$P_2$  - matriz reflexão utilizada para converter o sistema geodésico local levógiro para dextrógiro;

$R_2$  e  $R_3$  - matrizes de rotação, respectivamente, em torno dos eixos X e Z, sendo que para estações localizadas no hemisfério sul esta rotação será horária;

$\Delta X_{QP}, \Delta Y_{QP}, \Delta Z_{QP}$  - translações do ponto origem e arbitrário  $Q$  em relação à origem do sistema de referência  $P$ , respectivamente, em torno dos eixos X, Y e Z.

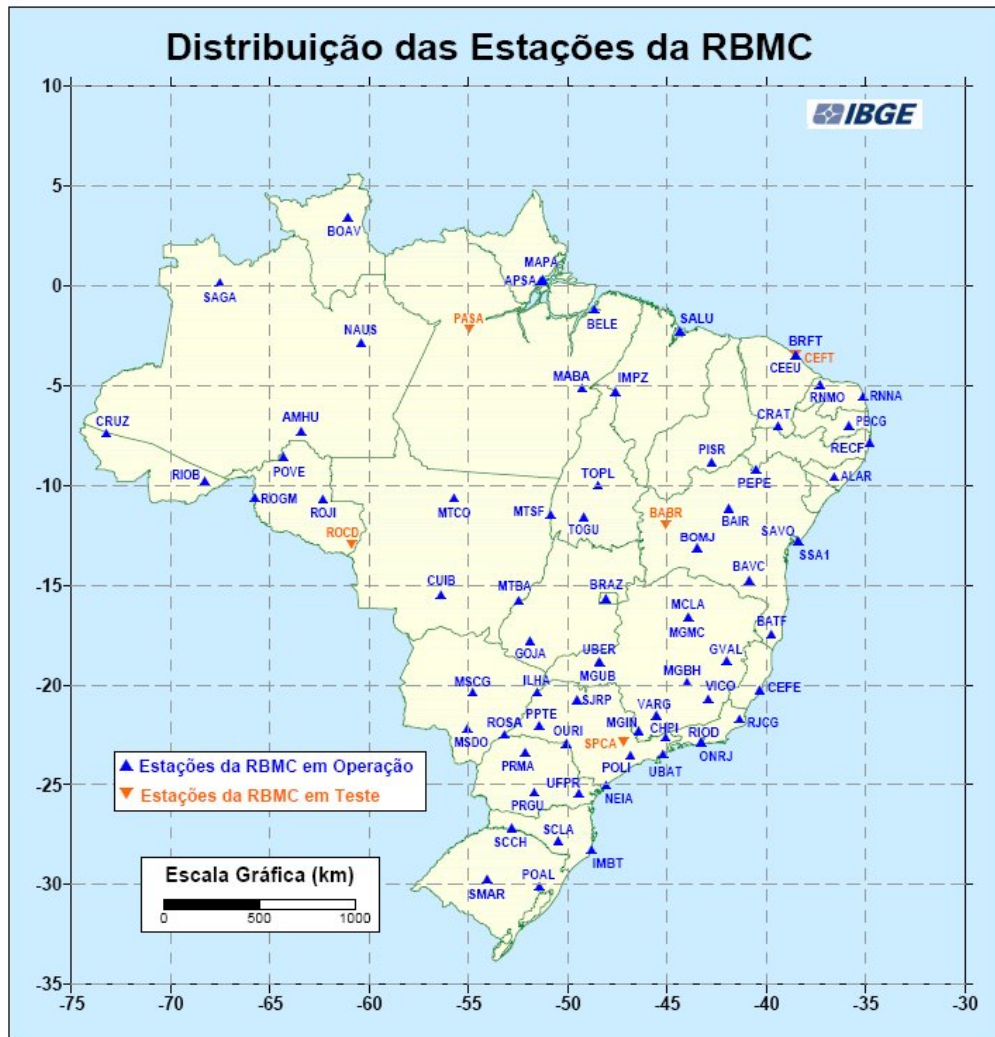
## 2.8 Sistema Geodésico Brasileiro

No Brasil, o IBGE por meio do Departamento de Geodésia, possui a atribuição de estabelecer e manter o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), caracterizado pelo conjunto de estações geodésicas representam o controle horizontal e vertical necessários ao desenvolvimento de obras de infra-estrutura no território nacional (IBGE, 2000).

O Departamento de Geodésia do IBGE, no final da década de 80, criou o projeto GPS com o intuito de estabelecer redes ativas como a RBMC e redes estaduais (ocupação passiva), além de metodologias que possibilitassem o uso e as potencialidades das tecnologias propostas pelo sistema GPS, no que concerne à evolução dos métodos e técnicas de posicionamento, bem como nos quesitos confiabilidade, rapidez e economia de recursos humanos e financeiros.

Neste contexto, destaca-se a RBMC que compreende, atualmente, mais de 70 estações GNSS fixas e de operação contínua, como ilustra a Figura 3, caracterizando uma estrutura de apoio às aplicações geodésicas e topográficas no Brasil, bem como ao relacionamento destas estações com sistemas adotados globalmente.





**Figura 3** - Estações da RBMC.

Fonte: IBGE (2009).

A evolução do SGB implicou na transição de sistemas de referência clássicos, como Córrego Alegre (GRS24 – Elipsóide Internacional de Hayford), Chuá Astro-Datum (GRS24) e SAD69 - *South American Datum* 1969 (GRS67 – *Geodetic Reference System* 1967), para referenciais geocêntricos como o SIRGAS2000 (GRS80), baseado na densificação do ITRF2000, que engloba todas as atividades necessárias para se estabelecer uma estrutura geodésica moderna no continente, compatível com a precisão das técnicas espaciais disponíveis atualmente (IBGE, 2003). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os elipsóides utilizados na definição destes referenciais:

**Tabela 3** - Parâmetros definidores dos GRS adotados no Brasil.

Parâmetros	SIRGAS	WGS84	SAD69	CA
Semi-eixo maior ( <i>a</i> )	6378137	6378137	6378160	6378388
Achatamento ( <i>1/f</i> )	298,257222101	298,257223563	298,25	297

(\* metros)

Ressalta-se, ainda, que muitos dos trabalhos cartográficos desenvolvidos no país encontram-se referenciados ao Córrego Alegre e ao SAD69, o que implica na necessidade de transformações entre sistemas de referência com concepções e realizações diferentes. Assim, assumindo-se que as coordenadas cartesianas estejam em SAD69 tem-se então que a transformação destas coordenadas para WGS84 (IBGE, 1989) e SIRGAS2000 (IBGE, 2005) é dada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SAD69} + \begin{bmatrix} -66,87 \\ 4,37 \\ -38,52 \end{bmatrix}_m \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SIRGAS\ 2000} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{SAD69} + \begin{bmatrix} -67,35 \\ 3,88 \\ -38,22 \end{bmatrix}_m \quad (11)$$

A utilização dos parâmetros descritos na Expressão 10 de acordo com a Resolução do IBGE nº 23 de 21/02/89 (R. PR 23/89), são válidos para realizar a transformação de coordenadas entre SAD69 e WGS84 em observações GPS efetuadas entre 01/01/1987 à 01/01/1994. Para observações realizadas após esse período deve-se adotar os parâmetros de transformação entre SAD69 e SIRGAS2000 divulgados pelo IBGE por meio da Resolução nº 1 de 25/02/2005 (R. PR 01/05), que também são válidos para as transformações entre SAD69 e WGS84 e foram utilizados na implementação do aplicativo ProGrid, programa de transformação de coordenadas, utilizando a opção SAD69 técnica Doppler ou GPS, e disponibilizados pelo IBGE no endereço: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

Para se obter as coordenadas em SAD69, a partir de coordenadas em WGS84 e SIRGAS2000 basta serem realizadas as transformações inversas. Verifica-se, nesta etapa, que não há parâmetros de transformação entre WGS84 e Córrego Alegre, o que implica que na necessidade de se converter primeiro as coordenadas de um ponto em WGS84 para SAD69 e, posteriormente, para CA como segue:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{CórregoAlegre}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{SAD69}} + \begin{bmatrix} 138,70 \\ -164,40 \\ -34,40 \end{bmatrix}_m \quad (12)$$

No SIRGAS2000, a atualização de coordenadas geodésicas tem sido realizada mediante a introdução no ajustamento, para as estações bases, das coordenadas das 21 estações vinculadas ao SGB. Juntamente com a realização do SIRGAS2000 foi disponibilizado um modelo de velocidade, para que os usuários que necessitem de alta acurácia possam fazer a propagação de coordenadas entre épocas distintas. Essas velocidades podem ser obtidas diretamente das séries temporais das estações ou dos modelos geodinâmicos disponíveis na literatura ou, ainda, por meio de modelos obtidos a partir de observação geodésica das estações contínuas, entre outros. Para o caso o SIRGAS utiliza-se o modelo VEMOS (*Velocity Model SIRGAS*), referenciado ao ITRF2005, para o cálculo das velocidades das estações SIRGAS e, para fins de atividades que necessitem dessas informações, tem-se o *software* VMS2009, modelo VEMOS2009, para atualização de coordenadas disponibilizado no endereço: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org) (SIRGAS, 2009).

A participação brasileira com as estações que compõem a RBMC garante a qualidade das efemérides em levantamentos executados em território nacional e, além disso, a atuação do IBGE junto a serviços internacionais como o IGS, com as estações de Brasília (BRAZ), Cachoeira Paulista (CHPI), Curitiba (UFPR), Fortaleza (BRFT), Porto Velho (POVE), Recife (RECF), Salvador (SAVO) e São Luís (SALU); o IVS, com a estação de Fortaleza, e o IDS (*Internacional DORIS Service*), com a estação de Cachoeira Paulista, contribuindo efetivamente ao desenvolvimento de uma estrutura geodésica de controle de precisão (SIRGAS, 2009).

Neste contexto, destaca-se, ainda, a participação do IBGE junto aos centros de análise locais da rede SIRGAS-CON, que em conjunto com os centros IGAC e CIMA compreendem as redes de densificação SIRGAS (SIRGAS-CON-D). Estes centros geram soluções semanais fracamente injuncionadas (*loosely constrained*) e soluções injuncionadas (*constrained*) de todas as estações SIRGAS, no formato SINEX, versão 1.0 (SIRGAS, 2009).

O nome de cada arquivo SINEX corresponde à *SIRwww7.SNX* em que os caracteres *SIR*, indicam que o conteúdo do arquivo trata-se de um produto oficial SIRGAS; os quatro dígitos *www* referem-se a semana GPS; o índice *7* indica que a solução trata-se da combinação de 7 soluções diárias e a sigla *SNX* indica o formato do arquivo SINEX, que

contém uma lista de informações sobre as estações (identificação do tipo de receptor e antena), altura da antena, estimativas dos parâmetros, parâmetros de orientação da Terra, Matriz Variância-Covariância (MVC), entre outras, e é padronizado para diferentes soluções espaciais (SIRGAS, 2009).

As soluções semanais fracamente injuncionadas antes da semana GPS 1400 (novembro de 2006), foram reprocessadas utilizando-se as correções absolutas das variações dos centros de fase das antenas IGS, utilizando como *datum* de referência o IGS05 (*IGS Reference Frame 05*), que utiliza o modelo de correção absoluta das variações do centro de fase das antenas IGS (PCV - *Phase Center Variations*). Essas soluções são identificadas pela nomenclatura *SI1www7.SNX*, em que o índice *SI1* indica que o arquivo se trata de uma solução reprocessada (SIRGAS, 2009).

As soluções semanais geradas pelos centros locais SIRGAS são utilizadas na integração das soluções da rede SIRGAS-CON, com as sub-redes SIRGAS-CON-D, pelo DGFI, na Alemanha, resultando em uma solução para a América Latina, denominada SIRGAS-CON-C, assegurando que as coordenadas e velocidades de todas as estações sejam estimadas com precisões compatíveis entre si e, ainda, o controle temporal da rede com base nas combinações anuais destas soluções (SIRGAS, 2009).

Esta combinação é, atualmente, realizada pelos DGFI e pelo IBGE (SIRGAS, 2009). As soluções fixas ou injuncionadas (*constrained*), por sua vez, são utilizadas para fins práticos que requeiram coordenadas e velocidades de referência na América Latina, bem como o estudo da variação temporal dessas coordenadas (SIRGAS, 2009).

A IGS-RNAAC-SIR contém, na atualidade, mais de 170 estações em operação. Na Figura 4, são apresentadas as estações incluídas na solução IGS-RNAAC-SIR (BRUNINI e SÁNCHEZ, 2007; SIRGAS, 2009).



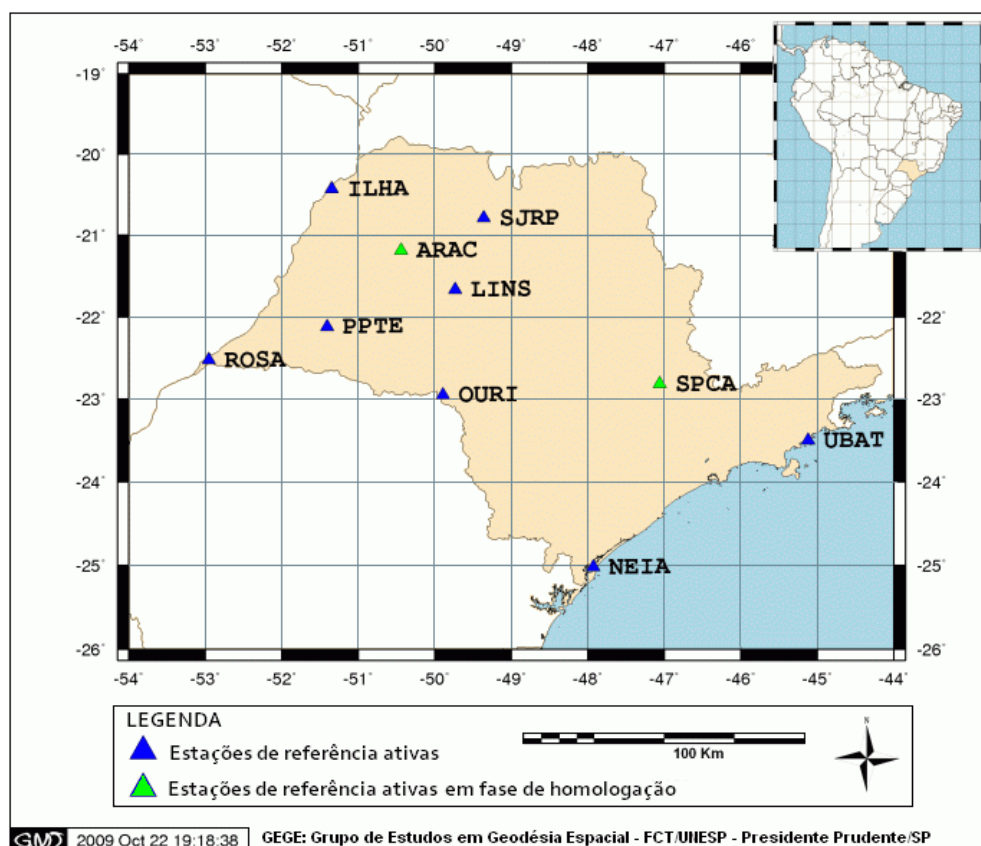
**Figura 4** - Estações que contribuem com o IGS-RNAAC-SIR.

**Fonte:** SIRGAS (2009).

As soluções semanais da IGS-RNAAC-SIR, fracamente injuncionadas, da semana 847 a semana 1520, encontram-se disponíveis no endereço: <ftp://ftp.dgfi.badw-muenchen.de/pub/gps/SIR/>, para semanas posteriores estas soluções encontram-se disponíveis no seguinte endereço: <ftp://ftp.dgfi.badw-muenchen.de/pub/gps/SIRGAS/>. Outras informações sobre diferentes produtos como mapas da ionosfera, soluções multi-anuais, soluções semanais fixas, podem ser encontradas na página oficial do SIRGAS, disponível no endereço: <http://www.sirgas.org> (SIRGAS, 2009).

Destaca-se ainda, nesta temática, as redes brasileiras GNSS de monitoramento contínuo do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) a RIBaC (Rede INCRA de bases Comunitárias do GPS) e a Rede GNSS Ativa do Estado São Paulo (Rede GNSS SP) mantida pela FCT/UNESP. A RIBaC é composta por estações dotadas de receptores de dupla frequência, localizadas em unidades próprias do INCRA e em Universidades Federais ou Estaduais, bem como em órgãos e Empresas Públicas e Privadas, com base em acordos específicos de cooperação, em especial, com o IBGE colaborando à expansão da rede geodésica brasileira. Atualmente, encontram-se em operação mais de 30 estações, cujo acesso aos dados é efetuado de forma gratuita e, exclusivamente, pela internet no endereço: <http://ribac.incra.gov.br/ribac> (INCRA, 2009).

A Rede GNSS SP, Figura 5, compreende, atualmente, as estações de Ilha Solteira (ILHA), São José do Rio Preto (SJRP), Rosana (ROSA), Ourinhos (OURI), Lins (LINS), cujas coordenadas já foram homologadas pelo IBGE, e em fase de homologação as estações de Araçatuba (ARAC) e da UNICAMP- Universidade de Campinas (SPCA). Em adição a essa rede tem-se disponível a estação de Presidente Prudente da RBMC.



**Figura 5 - Rede GNSS SP.**

**Fonte: GEGE (2009).**

Os dados dessas estações podem ser obtidos na página do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) no endereço: <http://gege.prudente.unesp.br>, no formato Hatanaka, ou via protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), mediante autorização prévia. Estes dados também estão sendo disponibilizados pelo BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*), na Alemanha, via protocolo NTRIP. Os dados das estações ROSA, OURI e SJRP encontram-se disponíveis, tanto no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) quanto no formato Hatanaka, no endereço. Informações mais detalhadas podem ser encontradas em GEGE (2009).

A Rede GNSS SP contribuirá com a infra-estrutura necessária para o desenvolvimento de inúmeras pesquisas e aplicações na Meteorologia e estudos da Ionosfera, monitoramento de deformações, georreferenciamento de imóveis rurais, levantamentos cadastrais, levantamentos topográficas, entre outras (GEGE, 2009).

### **3 ERROS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO RELATIVO**

O posicionamento por satélites pode ser realizado de forma pontual ou relativa. No primeiro caso, as coordenadas de um ponto são determinadas diretamente em relação ao geocentro, enquanto que no segundo as coordenadas deste ponto são calculadas com relação a outro ponto, cujas coordenadas devem ser conhecidas e devem estar referenciadas a um sistema de referência geocêntrico como o WGS84 ou ITRS, caso o levantamento seja efetuado com GPS. Em ambos os casos, o objeto cuja posição se deseja determinar, pode estar em repouso ou em movimento, sendo denominados, respectivamente de estático e cinemático.

No que concerne às redes geodésicas, caso deste trabalho, o método de posicionamento empregado é o relativo. Neste método são utilizadas, em geral, como observáveis fundamentais as Duplas Diferenças (DDs) da fase e/ou da pseudodistância, uma vez que erros comuns às estações que compõem uma mesma linha de base são eliminados no processo de dupla diferenciação. E, por esta razão, o posicionamento relativo tem sido comumente empregado em levantamentos geodésicos (LEICK, 2004).

Em levantamentos geodésicos de alta precisão, o método de levantamento relativo estático é o mais indicado. Em virtude do período de ocupação das estações no posicionamento relativo estático ser relativamente longo (no mínimo 20 minutos à algumas horas), apenas as DDs da fase da onda portadora são, em geral, incluídas como observáveis. E, sendo a precisão da fase da onda portadora superior à da pseudodistância, a participação desta última não melhora os resultados de forma significativa. Todavia, a utilização das

pseudodistâncias é de extrema relevância no pré-processamento para estimar o erro do relógio do receptor ou, ainda, calcular o instante aproximado de transmissão do sinal pelo satélite (MONICO, 2000).

Como mencionado anteriormente, devido à duração da coleta de dados ser relativamente longa, as ambigüidades, exceto quando erros inesperados ocorrem, são solucionadas e injuncionadas como um número inteiro no processo de ajustamento. Tal fato ocorre devido à alteração da geometria dos satélites durante a sessão, o que reduz a correlação entre as componentes da base (MONICO, 2000).

Com base nesta problemática, as principais fontes de erro envolvidas no posicionamento espacial devem ser investigadas, bem como os métodos e modelos que permitam a detecção, correção e/ou eliminação destes efeitos, proporcionando soluções mais consistentes e homogêneas. Assim, nas Seções seguintes serão abordados os principais erros envolvidos no posicionamento relativo, bem como os métodos e modelos utilizados para a correção desses efeitos.

### **3.1 Ionosfera**

Os sinais que se propagam pela atmosfera são diretamente influenciados pela ionosfera, meio dispersivo localizado a aproximadamente 50 a 1000 km de altitude e que se caracteriza pela alta concentração de elétrons livres e íons positivos, ocasionando alterações na modulação (código) e na fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 2004). O avanço da fase e o atraso do código apresentam o mesmo valor, porém, com sinais opostos, podendo atingir até 100 m (KLOBUCHAR, 1991).

O erro devido à ionosfera nas observáveis GPS (fase e pseudodistância) ao longo da direção do satélite e da antena receptora é dado em função do conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) e da frequência do sinal, Leick (2004). O TEC varia no tempo e espaço, o que dificulta a modelagem da ionosfera, uma vez que conduz a variações nas estimativas das coordenadas das estações e na origem do sistema de referência e, portanto, devem ser consideradas no ajustamento da rede.

Segundo Camargo (1999), estas variações são ocasionadas em razão do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estações do ano, localização do usuário e pela direção do raio vetor do satélite. Tais variações provocam não apenas o efeito da refração, como também a perda de sintonia entre o satélite e o receptor, pelo enfraquecimento do sinal, refletindo o impacto causado pelo fenômeno da cintilação.



No que concerne à localização geográfica, o Brasil é uma das regiões do globo terrestre mais afetadas pela ionosfera, já que se localiza na zona de influência da anomalia equatorial, o que influencia no posicionamento com receptores GPS de uma frequência, apresentando os maiores valores e variações do TEC (KOMJATHY et al., 2003), o que implica na necessidade de trabalhos cada vez mais detalhados desta natureza no país.

O erro devido à ionosfera para a fase ( $I_{fr}^s$ ) e código ( $I_{gr}^s$ ) ao longo da direção do satélite (s) e da antena receptora (r) é dado em função do TEC e da frequência do sinal (f), Camargo (1999):

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC \quad (13)$$

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (14)$$

Nas Equações 13 e 14 verifica-se que os erros devidos à refração ionosférica para a fase e código são de mesma magnitude, porém de sinais contrários, sendo ambos proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. A unidade do TEC é expressa em elétrons por metro quadrado ( $el/m^2$ ).

Em virtude da aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido à ionosfera, calculada por meio das Equações 13 e 14, expressa apenas o efeito de 1ª ordem da ionosfera, que pode ser modelado com dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência eliminados por meio da combinação linear entre as frequências L1 e L2 denominada *Ion-Free*, aplicada tanto para o código (P1 e P2) quanto para a fase (L1 e L2).

A combinação linear *Ion-Free* para a fase, em ciclos, para as portadoras L1 e L2, respectivamente, considerando-se apenas os efeitos de 1ª ordem, é determinada utilizando-se os coeficientes  $m_1$  e  $m_2$ , dada pela seguinte relação (GOAD, 1996):

$$\phi_{IF} = m_1 \phi_{rL1}^s + m_2 \phi_{rL2}^s \quad (15)$$

em que  $\phi_{rL1}^s$  e  $\phi_{rL2}^s$  são determinadas com base nas seguintes Equações:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} (\rho_r^s - I_{rL1}^s + T_r^s) + f_{L1} (dt_r - dt^s) + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (16)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} (\rho_r^s - I_{rL2}^s + T_r^s) + f_{L2} (dt_r - dt^s) + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (17)$$

Agrupando-se os termos em comum, nas Equações 16 e 17, e denotando-os por  $\rho'$ , tem-se:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} \rho' - \frac{f_{L1}}{c} I_{rL1}^s + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (18)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} \rho' - \frac{f_{L2}}{c} I_{rL2}^s + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (19)$$

Considerando-se os efeitos de 1ª ordem da ionosfera para a fase (Equação 13), para as portadoras L1 e L2, e substituindo-a nas Equações 18 e 19, tem-se:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} \rho' - \frac{f_{L1}}{c} \frac{40,3}{f_{L1}^2} TEC + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (20)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} \rho' - \frac{f_{L2}}{c} \frac{40,3}{f_{L2}^2} TEC + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (21)$$

Representando  $40,3TEC/c$  por  $I^{(1)}$ , nas Equações 20 e 21, tem-se:

$$\phi_{rL1}^s = \frac{f_{L1}}{c} \rho' - \frac{I^{(1)}}{f_{L1}} + N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} \quad (22)$$

$$\phi_{rL2}^s = \frac{f_{L2}}{c} \rho' - \frac{I^{(1)}}{f_{L2}} + N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \quad (23)$$

A frequência ( $f_{IF}$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda_{IF}$ ) da combinação linear *Ion-Free*:

$$f_{IF} = m_1 f_1 + m_2 f_2 \quad (24)$$

$$\lambda_{IF} = \frac{c}{m_1 f_1 + m_2 f_2} \quad (25)$$

A ambiguidade da  $\phi_{IF}$ , por sua vez, é dada pela Equação:

$$N_{IF} = N_1 m_1 + N_2 m_2. \quad (26)$$

que será um número inteiro se os coeficientes  $m_1$  e  $m_2$  também o forem. De acordo com Goad (1996), o efeito de 1ª ordem para a fase  $\left( \frac{I_{\phi r}^{(1)s}}{f} \right)$ , se anula somente se a seguinte condição se satisfaz:

$$\frac{m_1}{f_1} + \frac{m_2}{f_2} = 0. \quad (27)$$

Segundo Goad (1996), outra condição pode ser imposta desconsiderando-se o termo ionosférico, de forma que a combinação resultante entre as frequências L1 e L2 seja igual à frequência L1:

$$m_1 f_1 + m_2 f_2 = f_1. \quad (28)$$

Isolando-se os coeficientes  $m_1$  na Equação 44, obtém-se o coeficiente  $m_2$ :

$$m_2 = -\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (29)$$

e, por conseguinte, substituindo a Equação 29 na Equação 27, obtém-se  $m_1$  dado por:

$$m_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (30)$$

Como as frequências L1 e L2 no sistema GPS são respectivamente, 1575,42 MHz e 1227,60 MHz, tem-se que os valores para  $m_1$  e  $m_2$  são, respectivamente, de 2,5457 e -1,9837. Caso se considere a frequência da combinação linear *Ion-Free* na Equação 28 igual à frequência da L2, os valores de  $m_1$  e  $m_2$  serão, respectivamente, 1,9837 e -1,5457.

Logo, substituindo os valores de  $m_1$  e  $m_2$  encontrados, respectivamente, nas Equações 30 e 29, a combinação *Ion-Free* (Equação 15) entre as portadoras L1 e L2 poderá ser expressa por:

$$\phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{rL1}^s - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{rL2}^s \quad (31)$$

e, substituindo-se as Equações 22 e 23 na Equação 31, tem-se:

$$\phi_{IF} = \frac{f_1}{c} \rho' + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (N_{rL1}^s + \varepsilon_{\phi_{rL1}^s}) - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (N_{rL2}^s + \varepsilon_{\phi_{rL2}^s}). \quad (32)$$

Substituindo  $\rho'$  na Equação 32 tem-se que:

$$\begin{aligned} \phi_{IF} = & \frac{f_1}{c} (\rho_r^s + T_r^s) + f_1 (dt_r - dt^s) + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{rL1}^s - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{rL2}^s + \\ & + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varepsilon_{\phi_{rL1}^s} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varepsilon_{\phi_{rL2}^s} \end{aligned} \quad (33)$$

Verifica-se, portanto, na Equação 33, que os efeitos de 1ª ordem da ionosfera são eliminados na *Ion-Free*.

A combinação *Ion-Free* para a pseudodistância, considerando-se apenas o efeito de 1ª ordem para P1 e P2 é dada pela Equação 34:

$$PD_{IF} = \frac{f_2}{f_1}(\rho_r^s) + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \varepsilon_{\phi_r L1}^s - \varepsilon_{\phi_r L2}^s. \quad (34)$$

Desta forma, os valores encontrados para  $m_1$  e  $m_2$  serão, respectivamente, de 2,5457 e -1,5457. E, por sua vez, adotando-se a frequência da combinação linear *Ion-Free* na Equação 28 igual à frequência da L2, os valores encontrados serão, respectivamente de 1,9837 e 1,2045.

A incerteza da combinação linear *Ion-Free* ( $\sigma_{\phi_{IF}}$ ) pode ser obtida a partir da aplicação da lei de propagação de variância e covariância na Equação 35, tanto para a fase quanto para a pseudodistância, é dada por:

$$\sigma_{\phi_{IF}} = \sqrt{m_1^2 \sigma_{\phi_1}^2 + m_2^2 \sigma_{\phi_2}^2}, \quad (35)$$

onde  $\sigma_{\phi_1}$  e  $\sigma_{\phi_2}$  são, neste caso, as incertezas das medidas originais de fase.

Adotando-se os valores de 2 mm e 3 mm para  $\sigma_{\phi_1}$  e  $\sigma_{\phi_2}$ , respectivamente, a incerteza  $\sigma_{\phi_{IF}}$  obtida pela Equação 35, resulta em 7,832 mm, o que implica que a incerteza da combinação linear *Ion-Free* seja fortemente degradada em relação à incerteza das medidas originais (SEEBER, 2003 e MONICO, 2008). A combinação *Ion-Free* realça, ainda, o nível de ruído de outros efeitos como, por exemplo, o multicaminho. Além disso, a ambigüidade da combinação deixa de ser inteira, algo que requer técnicas apropriadas para a sua determinação (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001; LEICK, 2004).

### 3.1.1 Modelagem dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera

A combinação linear das observáveis fundamentais do GPS (fase e pseudodistância), coletadas com receptores de dupla frequência, permite a eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera por meio da combinação denominada *Ion-Free* (MONICO, 2000). Todavia, os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera não são eliminados nesta combinação, o que acarreta variações nas coordenadas das estações da ordem de centímetros, dependendo do dia do ano, ciclo solar e geometria relativa do campo magnético e do TEC presentes na trajetória

receptor satélite (FRITSHE et al., 2005; BASSIRI e HAJJ, 1993). Logo, para redes geodésicas de alta precisão, deve-se modelar a influência dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, tanto para as posições dos receptores, quanto para todos os parâmetros incluídos no processamento e ajustamento da rede como órbitas dos satélites, parâmetros de orientação da Terra, entre outros.

Com a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera se espera melhoras significativas em termos de acurácia e homogeneidade das séries temporais dos parâmetros envolvidos no processamento de uma rede geodésica de alta precisão (STEINGENBERGER et al., 2006). Segundo Hernández-Pajares et al. (2005), resultados mais consistentes e realistas podem ser obtidos com a aplicação do modelo para a representação do campo magnético da Terra desenvolvido pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), que vem sendo recomendado para trabalhos científicos pela IAGA (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy*). O modelo do IGRF compreende um conjunto de coeficientes harmônicos esféricos globais válidos para um período de 5 anos, que baseiam-se em dados disponíveis a partir de fontes que incluem medidas do campo geomagnético, observações de satélites e outras. Encontra-se disponível, atualmente, o modelo IGRF05, o qual é válido para o período de 2005 a 2010 e, além disso, sub-rotinas que permitem calcular as componentes do campo-geomagnético (MARQUES, 2008). Mais detalhes a respeito do modelo do IGRF pode ser encontrados em Macmillan (2005).

O estudo do impacto dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento com GPS é encontrado, com riqueza de detalhes, em trabalhos como Bassiri e Hajj (1993), Odijk (2002), Hernández-Pajares et al. (2005), dentre outros. Nesta dissertação, será utilizado o programa desenvolvido por Marques (2008), cujas formulações referentes aos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera baseiam-se em Bassiri e Hajj (1993) e Odijk (2002). Nesta perspectiva, as próximas formulações serão baseadas nos trabalhos desenvolvidos pelos respectivos autores, que se baseiam na modelagem realística da densidade de elétrons presentes na ionosfera com base no modelo ionosférico desenvolvido por Brunner e Gu<sup>1</sup> (1991) apud Marques (2008), que consiste em duas funções do tipo *Charpman* para representar a parte inferior e superior dos perfis da densidade de elétrons. Os perfis de *Charpman* são muito utilizados para descrever a distribuição da densidade de elétrons em função da altura da ionosfera. Para mais detalhes consultar Marques (2008).

---

<sup>1</sup> BRUNNER, F.; GU, M. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observation, **Manuscr. Geod.**, v. 16, p. 205-214, jan.1991.

Segundo Odiik (2002), para se obter os efeitos de primeira, segunda e terceira ordem da ionosfera é necessário utilizar o índice de refração da ionosfera. Assim, ao se inserir esse índice na equação que descreve o comprimento do caminho óptico entre o satélite e o receptor (Equação 52), é possível obter o efeito de propagação do sinal para a fase e para o grupo (Equação 53).

O comprimento do caminho óptico entre o satélite e o receptor é determinado em função do índice de refatividade para a fase  $n_{\phi}^{iono} = \frac{c}{v_{\phi}}$  e para o grupo  $n_g^{iono} = \frac{c}{v_g}$ , definido pela razão entre a velocidade da luz ( $c$ ) e da velocidade da fase ( $v_{\phi} = dl_{\phi}/dt_{\phi}$ ) e do grupo ( $v_g$ ), dado por:

$$\begin{aligned} \ell_{\phi} &= ct_{\phi} = c \int dt_{\phi} = \int \frac{c}{v_{\phi}} dl_{\phi} = \int n_{\phi} dl_{\phi} \\ &= \rho + \underbrace{\int (n_{\phi} - 1) d\rho}_{\mathcal{G}_{\phi}} + \underbrace{\left( \int n_{\phi} dl_{\phi} - \int n_{\phi} d\rho \right)}_{k_{\phi}} \end{aligned} \quad (36)$$

onde,  $\rho$  denota a distância geométrica entre o satélite e o receptor (ODIJK, 2002). A curvatura entre a trajetória efetivamente percorrida pelo sinal e a distância geométrica deve-se a dois efeitos: o efeito de propagação, denotado por  $\mathcal{G}_{\phi}$  e o efeito de curvatura, denotado por  $k_{\phi}$  (ODIJK, 2002).

Assim, o efeito da propagação do sinal para a fase e para o grupo ( $\mathcal{G}_{\phi}^{iono}, \mathcal{G}_g^{iono}$ ) é expresso por:

$$\mathcal{G}_{\phi}^{iono} = - \underbrace{\frac{1}{2f^2} \int f_p^2 d\rho}_{I_{\phi}^{(1)}} - \underbrace{\frac{1}{2f^3} \int f_p^2 f_g |\cos \theta| d\rho}_{I_{\phi}^{(2)}} - \underbrace{\frac{1}{8f^4} \int f_p^4 d\rho}_{I_{\phi}^{(3)}} \quad (37)$$

$$\mathcal{G}_g^{iono} = \underbrace{\frac{1}{2f^2} \int f_p^2 d\rho}_{I_g^{(1)}} + \underbrace{\frac{1}{f^3} \int f_p^2 f_g |\cos \theta| d\rho}_{I_g^{(2)}} + \underbrace{\frac{3}{8f^4} \int f_p^4 d\rho}_{I_g^{(3)}}$$

A Equação 37 mostra, respectivamente, que o avanço da fase e o atraso do grupo são funções dependentes dos efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera (ODIJK, 2002). Para o caso do grupo estes efeitos são denotados por  $I_g^{(1)}$ ,  $I_g^{(2)}$  e  $I_g^{(3)}$ .

Assim, inserindo-se na Equação 37, a frequência de plasma do elétron (Equação 38) e a frequência de giro (Equação 39):

$$f_p = \sqrt{AN_e}, \text{ com } A \approx 80,6m^3 / s^2, \quad (38)$$

$$f_g = \frac{e}{2\pi m_e} \|\vec{B}\|, \quad (39)$$

os efeitos da refração ionosférica para o grupo podem ser descritos por (ODIJK, 2002):

$$\begin{aligned} I_g^{(1)} &= \frac{A}{2f^2} \int N_e d\rho \\ I_g^{(2)} &= \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \int \|\vec{B}\| \cos \theta |N_e| d\rho \\ I_g^{(3)} &= \frac{3A}{8f^4} \int N_e^2 d\rho \end{aligned} \quad (40)$$

onde:

$N_e$  - densidade de elétrons livres em  $m^{-3}$ ;

$e$  - carga do elétron igual a, aproximadamente,  $1,60218 \cdot 10^{-19}$ ;

$m_e$  - massa do elétron correspondente a  $9,10939 \cdot 10^{-31} kg$ ;

$\|\vec{B}\|$  - comprimento do vetor de indução geomagnética  $B$  em unidades de Tesla (volts-segundos/metros<sup>2</sup>);

$\theta$  - ângulo formado entre  $B$  e a direção da propagação do sinal entre o satélite e a antena receptora.

Adicionando os efeitos de propagação do sinal (Equações 37 e 40) e na Equação 36, o avanço ionosférico da fase e o atraso do grupo, podem ser escritos como (ODIJK, 2002):

$$\ell_\phi = -I_\phi^{(1)} - \frac{1}{2} I_\phi^{(2)} - \frac{1}{3} I_\phi^{(3)} + k_\phi^{iono}, \quad (41)$$

$$\ell_g = I_g^{(1)} + I_g^{(2)} + I_g^{(3)} + k_g^{iono}$$

onde  $k$ , como dito anteriormente, é o efeito de curvatura.

Na Equação 41, verifica-se que o efeito de 1ª ordem da ionosfera para a fase e para o grupo apresenta a mesma magnitude, porém, sinais opostos. Esta constatação também é verificada para os efeitos de 2ª e 3ª ordem, contudo, para a fase esses efeitos representam, respectivamente, a metade e a um terço dos efeitos do grupo (ODIJK, 2002; MARQUES, 2008).

A Tabela 4 apresenta o erro máximo na direção vertical que pode ser obtido para as portadoras  $L_1$ ,  $L_2$  e para a combinação *Ion-Free* ( $L_0$ ), considerando os efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera:

**Tabela 4** – Erro máximo devido à ionosfera, em metros, para as medidas obtidas na vertical.

Frequência	1ª ordem ( $1/f^2$ )	2ª ordem ( $1/f^3$ )	3ª ordem ( $1/f^4$ )
$L_1$	32,5 m	0,036 m	0,002 m
$L_2$	53,5 m	0,076 m	0,007 m
$L_0$	0,0 m	0,026 m	0,006 m

**Fonte:** Seeber (2003).

A influência do erro devido à ionosfera aumenta para direções inclinadas, ou seja, medidas a partir dos satélites que se deslocam na direção do zênite ao horizonte (SEEBER, 2003).

#### a) Efeitos de 1ª ordem

O efeito de 1ª ordem da ionosfera pode variar da ordem de 1 a 30 metros e depende, exclusivamente, da densidade do TEC presentes ao longo da trajetória geométrica percorrida pelo sinal entre o satélite e a antena receptora, ou seja, STEC (*Slant* TEC), dada em função do termo  $\int N_e d\rho$  e que é projetada na direção vertical (VTEC - Vertical TEC) (ODIJK, 2002). Nesta perspectiva, o atraso ionosférico causado pelo efeito de 1ª ordem pode ser definido como (ODIJK, 2002):

$$I_g^{(1)} = \frac{A}{2f^2} TEC = \frac{40,3}{f^2} STEC \quad (42)$$

$$I_\phi^{(1)} = -\frac{A}{2f^2} TEC = -\frac{40,3}{f^2} STEC$$



### b) Efeitos de 2ª ordem

Como observado nas Equações 40, os efeitos de 1ª ordem da ionosfera estão associados diretamente à densidade de elétrons presentes no interior de uma coluna cilíndrica na área que contempla o satélite e a antena receptora. Os termos de 2º e 3ª ordem da ionosfera, por sua vez, dependem não apenas deste fator, mas, também do campo magnético da Terra na direção satélite receptor (BASSIRI e HAJJ, 1993; HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2005).

O efeito de 2ª ordem da ionosfera (Equação 40) para o caso do grupo pode ser expresso por:

$$I_s^{(2)} = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \int \|\vec{B}\| |\cos \theta| N_e d\rho. \quad (43)$$

Segundo Odijk (2002), com base em uma simples camada infinitesimal da ionosfera, pode-se assumir que o produto vetorial  $\|\vec{B}\| |\cos \theta|$  é uma constante ao longo do caminho percorrido pelo sinal e que  $\int N_e d\rho$  corresponde ao STEC. Nesta perspectiva, tem-se que o atraso ionosférico para o grupo é calculado por:

$$I_s^{(2)} = \frac{eA}{f^3 2\pi m_e} \|\vec{B}\| |\cos \theta| STEC. \quad (44)$$

Verifica-se, portanto, que para calcular o efeito de 2ª ordem da ionosfera é necessário calcular o produto  $\|\vec{B}\| |\cos \theta|$  e, para tanto, torna-se necessário identificar o produto interno do vetor de indução magnética ( $\vec{B}$ ) com o vetor unitário ( $\vec{J}$ ) na direção da propagação do sinal na altura da camada ionosférica. Deste modo, o produto  $\|\vec{B}\| |\cos \theta|$  pode ser obtido por  $\|\vec{B}\| |\cos \theta| = \|\vec{B}\| \|\vec{J}\| |\cos \theta| = \vec{B}^t \cdot \vec{J}$ . Para maiores detalhes consultar Odijk (2002) e Marques (2008).

A importância da correção do termo de 2ª ordem da ionosfera no posicionamento utilizando receptores GPS deve-se principalmente a dependência do STEC, o que implica que a aplicação deste termo seja fundamental em regiões de baixas latitudes, períodos de máxima atividade solar e para linhas de bases longas. Para médias-latitudes e períodos de mínima atividade solar, porém, este termo pode ser negligenciado para linhas de base curtas no processo de Dupla Diferença de Observáveis (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2005).

### c) Efeitos de 3ª ordem

De acordo com Odiijk (2002), o atraso ionosférico de 3ª ordem para o grupo Equação 40 é denotado por:

$$I_g^{(3)} = \frac{3A}{8f^4} \int N_e^2 d\rho. \quad (45)$$

Para a resolução da integral que compõem a Equação 45, em geral, utiliza-se uma aproximação dada por (HATMANN e LEITINGER<sup>2</sup>, 1984 apud ODIJK, 2002):

$$\int N_e^2 d\rho = \eta N_e TEC, \quad (46)$$

o que implica que o atraso ionosférico de 3ª ordem possa ser denotado por:

$$I_g^{(3)} = \frac{3A^2}{8f^4} \eta N_e STEC. \quad (47)$$

O impacto do efeito de 3ª ordem da ionosfera, assim como nos efeitos de 1ª e 2ª ordem são calculados em função do STEC. Todavia, este efeito é descrito ainda pela  $N_e$  e, ainda, de um fator  $\eta$ , cujo valor é constante e igual a 0,66 (ODIJK, 2002).

### d) Cálculo do TEC com base na pseudodistância

O conhecimento do TEC pode ser utilizado para determinar o efeito de 2ª ordem da ionosfera e, por conseguinte, reduzir significativamente os erros nas medidas das observáveis GPS na ordem sub-centimétrica (Bassiri e Hajj, 1993). O cálculo do STEC pode ser obtido a partir das medidas de pseudodistâncias para as duas frequências (L1 e L2) dos satélites GPS, considerando-se somente os efeitos de 1ª ordem da ionosfera e as componentes de atraso de *hardware* do receptor e do satélite como segue:

$$PD_{rL1}^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + cb_{rL1} + cb_{L1}^s + I_{gL1}^{(1)} + \varepsilon_{PD_{rL1}^s} \quad (48)$$

$$PD_{rL2}^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + cb_{rL2} + cb_{L2}^s + I_{gL2}^{(1)} + \varepsilon_{PD_{rL2}^s}$$

onde:

---

<sup>2</sup> HARTMANN, G.K.; LEITINGER, R.. 1984. Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz. **Bulletin Géodésique**, 58, p. 109-136.

$b_{rL1}$  e  $b_{rL2}$  - correspondem ao atraso do *hardware* no receptor  $r$ , respectivamente, para as portadoras L1 e L2;

$b^s_{L1}$  e  $b^s_{L2}$  - correspondem ao atraso do *hardware* no satélite  $s$ , respectivamente, para as portadoras L1 e L2;

$I^{(1)}_{sL1}$  e  $I^{(1)}_{sL2}$  - efeito de 1ª ordem da ionosfera, respectivamente, para as portadoras L1 e L2;

Introduzindo na Equação 48, o efeito de 1ª ordem em função do TEC, tem-se:

$$PD^s_{rL1} = \rho^s_r + c(dt_r - dt^s) + cb_{rL1} + cb^s_{L1} + \frac{40,3}{f_{L1}^2} STEC + \varepsilon_{PD^s_{rL1}} \quad (49)$$

$$PD^s_{rL2} = \rho^s_r + c(dt_r - dt^s) + cb_{rL2} + cb^s_{L2} + \frac{40,3}{f_{L2}^2} STEC + \varepsilon_{PD^s_{rL2}}$$

Na Equação 49, agrupando-se os termos em comum e denominando-os por  $\rho' = \rho^s_r + c(dt_r - dt^s)$ , tem-se que:

$$PD^s_{rL1} = \rho' + cb_{rL1} + cb^s_{L1} + \frac{40,3}{f_{L1}^2} STEC + \varepsilon_{PD^s_{rL1}} \quad (50)$$

$$PD^s_{rL2} = \rho' + cb_{rL2} + cb^s_{L2} + \frac{40,3}{f_{L2}^2} STEC + \varepsilon_{PD^s_{rL2}}$$

Realizando-se a combinação ionosférica  $PD^s_{rL1} - PD^s_{rL2}$  tem-se que (CIRAIOLO et al., 2007; MATSUOKA e CAMARGO, 2004):

$$PD^s_{rL1} - PD^s_{rL2} = c[b_{rL1} - b_{rL2}] + c[b^s_{L1} - b^s_{L2}] + \frac{40,3}{f_{L1}^2} STEC - \frac{40,3}{f_{L2}^2} STEC + \varepsilon_{PD^s_{rL1}} - \varepsilon_{PD^s_{rL2}} \quad (51)$$

Agrupando-se os termos comuns na Equação 51, tem-se que:

$$PD^s_{rL1} - PD^s_{rL2} = cDCB_r + cDCB^s + 40,3 STEC \left( \frac{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}{f_{L1}^2 \cdot f_{L2}^2} \right) + \Delta\varepsilon_{PD^s_{L1,L2}} \quad (52)$$

Verifica-se na Equação 52 que a distância geométrica entre o satélite e o receptor é eliminada, sendo denominada combinação livre da geometria. Isolando-se o valor do STEC na Equação 52, tem-se que:

$$STEC = \frac{f_{L1}^2 \cdot f_{L2}^2}{40,3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} (PD_{rL1}^s - PD_{rL2}^s - cDCB_r - cDCB^s + \Delta\epsilon_{L1,L2}) \quad (53)$$

Segundo Matsuoka e Camargo (2004), o TEC também pode ser obtido a partir da pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora, o que contribui à obtenção de resultados mais suavizados do que os valores de TEC obtidos pela pseudodistância (Equação 69), uma vez que esta proporciona resultados mais ruidosos. Além disso, dentre as alternativas propostas para a obtenção do TEC pode-se, ainda, obtê-lo por meio dos Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionosphere Map*), os quais são disponibilizados via Internet (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) pela agência CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*). Os GIM possuem estimativa do VTEC, TEC projetado na direção zenital, em um *grid* com dimensões de dois graus de latitude por cinco de longitude num intervalo de tempo de duas em duas horas e, apresentam ainda, uma estimativa diária para os valores dos DCBs dos satélites e de vários receptores que fazem parte da rede de estações ativas do IGS (MATUOKA e CAMARGO, 2004).

### 3.2 Troposfera

A variação da refratividade atmosférica causa mudanças na direção e velocidade das ondas eletromagnéticas ao se propagarem na atmosfera. Esse efeito depende da massa gasosa, encontrada nas baixas camadas da atmosfera (em torno de 50 km). Esse efeito pode ser dividido em duas componentes, hidrostática e úmida, e ocasiona uma leve curvatura na trajetória do sinal entre o satélite e a antena receptora. Caso não seja removido, este efeito acarretará erros nas estimativas finais das coordenadas. A diferença entre a trajetória efetivamente percorrida pelo sinal e a distância geométrica entre o satélite e o receptor é denominada atraso troposférico (SAPUCCI, MONICO e MACHADO, 2007).

Dependendo do nível de precisão requerido no posicionamento, a modelagem desse efeito faz-se necessária. Para tanto, são empregadas funções de mapeamento que projetam os valores desse atraso da direção satélite-receptor para a direção zenital do usuário. Desta maneira, obtém-se o atraso zenital troposférico, os quais podem ser estimados com base em perfis verticais de temperatura, pressão e umidade do ar (SAPUCCI, 2005).

A escolha da função de mapeamento deve estar associada à menor dependência do ângulo de elevação, como também da qualidade dos modelos adotados na correção deste efeito como, por exemplo, os modelos de Predição Numérica do Tempo (NWP – *Numerical Weather Prediction*) e os modelos empíricos da troposfera. Com base nestas funções as variações da refratividade em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. Desta forma, a refratividade atmosférica pode ser considerada como uma função da temperatura, da densidade do ar e da pressão parcial do vapor d’água, com valores variando em função da altitude (SAPUCCI; MONICO e MACHADO, 2007).

Estes modelos contêm informações sobre temperatura, umidade, velocidade e direção do vento, quantidade de precipitação, entre outras (JENSEN; TSCHERNING e MADSEN, 2002). Além disso, tem-se utilizado diferentes técnicas de processamento, em virtude da impossibilidade de se avaliar com precisão a pressão e a temperatura atmosférica ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, o que vem beneficiando aplicações em tempo real (VEY et al., 2006).

De forma geral, os modelos que estimam o atraso troposférico entre a antena de um receptor ( $r$ ) e um satélite ( $s$ ) têm a seguinte forma:

$$T_r^s = 10^{-6} \int N_T ds, \quad (54)$$

onde  $N_T = (n-1) \cdot 10^{-6}$  é a refratividade da troposfera. A integral ao longo do caminho percorrido pelo sinal é solucionada quando se conhece o valor de  $N_T$  (MONICO, 2000; KLEIJER, 2004).

A modelagem do atraso troposférico baseia-se, portanto, no somatório dos efeitos das componentes hidrostática e úmida. Assim, cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital (vertical) com uma função de mapeamento, que relaciona o atraso vertical para diferentes ângulos de elevação ( $e$ ). De forma simplificada, pode ser escrita como (DAVIS et al.<sup>3</sup>, 1985 apud NIEEL, 1996):

$$T_r^s(e) = T_h^z \cdot mf_h(e) + T_w^z \cdot mf_w(e), \quad (55)$$

onde:

---

<sup>3</sup> DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO, I. I., ROGERS, A. E. E. & ELGERED, G. Geodesy by radio interferometry : Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. **Radio Science**, n. 20, p. 1593 - 1607. 1985

$e$  - ângulo de elevação;

$T_s^r$  - atraso troposférico total para um ângulo de elevação ( $e$ ) entre o satélite ( $s$ ) e o receptor ( $r$ );

$T_h^z$  e  $T_w^z$  - atraso troposférico total na direção zenital ( $z$ ), respectivamente, para as componentes hidrostática ( $h$ ) e úmida ( $w$ );

$mf_h$  e  $mf_w$  - funções de mapeamento, respectivamente, para as componentes hidrostática ( $h$ ) e para a componente úmida ( $w$ ), obtidas em função do ângulo de elevação ( $e$ );

As funções de mapeamento  $mf_h$  e  $mf_w$  são independentes do azimute de observação e têm sido determinadas separadamente por meio de três coeficientes de uma fração contínua (MARINI<sup>4</sup>, 1972 apud NIELL, 1996), os quais têm sido determinados com base em padrões atmosféricos (CHAO<sup>5</sup>, 1974 apud NIELL, 1996), dados obtidos por rádiosondas (NIELL, 1996) e, mais recentemente, por meio de NWP (NIELL 2000; BOEHM e SCHUH, 2004).

#### a) Modelos empíricos da troposfera

Um dos modelos mais conhecidos é o de Hopfield cujo algoritmo resultante é dado por (SEEBER, 2003):

$$T_r^s(e) = T_h^z \cdot mf_h(e) + T_w^z \cdot mf_w(e)$$

$$T_h^z = 155,2 \cdot 10^{-7} \frac{P}{T} H_d$$

$$T_w^z = 155,2 \cdot 10^{-7} \frac{4810e}{T^2} H_w$$

$$mf_h(e) = (\text{sen}(e^2 + 6,25)^{1/2})^{-1} \tag{56}$$

$$mf_w(e) = (\text{sen}(e^2 + 2,25)^{1/2})^{-1}$$

$$H_d = 40136 + 148,72(T - 273,16)$$

$$H_w = 11000m$$

<sup>4</sup> MARINI, J. W., Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. **Radio Sci.**, 7, p. 223-231, 1972.

<sup>5</sup> CHAO, C. C., The tropospheric calibration model for Mariner Mars 1971, **Tech. Rep.** 32, p. 61-76, Jet Propul. Lab., Pasadena, Calif., 1974.

Os termos  $T_h^z$  e  $T_w^z$  descrevem o efeito total da refração troposférica na direção do zênite e as funções de mapeamento  $mf_h$  e  $mf_w$  são as funções de mapeamento dadas em função do ângulo de elevação  $e$  em graus (SEEBER, 2003).

Saastamoinen<sup>6</sup> (1972) apud Niell (1996) desenvolveu um modelo baseado na suposição do decréscimo linear da temperatura até a tropopausa e, acima dessa, um valor constante caracteriza a estratosfera como um modelo isotérmico. O modelo de Saastamoinen assume, ainda, uma atmosfera em equilíbrio hidrostático e que todo o vapor de água que se concentra na troposfera comporta-se como um gás ideal. Para determinar a pressão parcial do ar seco e do vapor de água Saastamoinen empregou equações exponenciais, uma vez que os valores crescem rapidamente à medida que a pressão total da troposfera aumenta (MONICO, 2000).

O modelo padrão descrito por Saastamoinen, com alguns refinamentos, é descrito por (HOFMANNWELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001; KLEIJER, 2004 e MONICO, 2000):

$$T_r^s = 0,002277(1 + D) \sec \psi \left[ P + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 \psi \right] + \partial_R \quad (57)$$

onde  $P$  e  $e$  referem-se, respectivamente, a pressão superficial em milibares do ar seco e vapor d'água e  $T$  à temperatura em graus Kelvin. Os termos  $B$  e  $\partial_R$  correspondem aos fatores de correção (HOFMANNWELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001) e  $\psi = 90^\circ - e$ . O valor de  $D$  é obtido a partir da seguinte Equação:

$$D = 0,0026 \cos 2\phi + 0,00028H, \quad (58)$$

sendo  $\phi$  é a latitude do lugar e  $H$  é a altitude ortométrica em km (MONICO, 2000). Mais detalhes sobre as deduções envolvidas no modelo de Saastamoinen podem ser encontrados em Kleijer (2004).

Os valores de pressão ( $P$ ), temperatura ( $T$ ) e ângulo de elevação ( $e$ ) a serem utilizados nestes modelos são, usualmente, calculados para uma atmosfera padrão. Estes valores podem ser obtidos usando as seguintes Equações:

---

<sup>6</sup> SAASTAMOINEN, J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of Artificial Satellites for Geodesy. **Geophys.** Monogr. Ser., vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B.F. Chovitz, p. 247-251, AGU, Washington, D.C., 1972.

$$\begin{aligned}
P &= P_r (1 - 0,0000226(H - H_r))^{5,225} \\
T &= T_r - 0,0065(H - H_r) \\
H_u &= H_{ur} e^{-0,0006396(H - H_r)}
\end{aligned} \tag{59}$$

onde  $P_r$ ,  $T_r$  e  $H_{ur}$  são, respectivamente, a pressão, a temperatura e a umidade na altura de referência  $H_r$  (MONICO, 2008).

Uma avaliação do desempenho dos modelos de Hopfield e Saastamoinen na modelagem do atraso zenital troposférico na região brasileira é apresentado em Sapucci e Monico (2001).

### b) Funções de mapeamento derivadas de modelos de previsão numérica do tempo

Funções de mapeamento baseadas em parâmetros meteorológicos têm sido desenvolvidas com o intuito de facilitar a modelagem das variações da refratividade, e por consequência o atraso troposférico. A implementação destas funções deve reduzir a contribuição dos erros ocasionados pela refração troposférica no posicionamento geodésico, em especial na componente altimétrica das estações (NIEEL, 1996; NIEEL, 2000).

De acordo com Boehm, Werl e Schuh (2006), as funções de mapeamento derivadas de NWP, bem como a função de Niell (NMF - *Niell Mapping Function*) adotada em estratégias anteriores ao reprocessamento da rede GNSS, utilizam 3 coeficientes de uma fração contínua no mapeamento das componentes hidrostática e úmida da troposfera dada pela seguinte função:

$$m(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin(e) + \frac{a}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}}, \tag{60}$$

onde os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  são determinados separadamente para cada componente em função do ângulo de elevação ( $e$ ). Todavia, em regiões próximas ao equador e em altas latitudes, estes coeficientes têm deficiências, que poderão influenciar nas alturas das estações em torno de 4 mm, o que implica na necessidade em se reestimar estes coeficientes (BOEHM; WERL e SCHUH, 2006).



As funções de mapeamento são calculadas com base em perfis verticais de pressão, temperatura e umidade relativa do ar e, por conseguinte, da distribuição vertical da refratividade troposférica (BOEHM et al., 2006). A função de mapeamento é distintamente tratada para as componentes hidrostática e úmida e o erro inerente à parte hidrostática da troposfera é dominante sobre o erro acarretado pela componente úmida, correspondendo a 90% deste efeito (MONICO, 2000).

Nesta perspectiva, Niell (2003) desenvolveu a IMF (*Isobaric Mapping Function*) que vem possibilitando uma avaliação mais adequada do estado da atmosfera, reduzindo a dependência do ângulo de elevação em 20% (VEY et al., 2006). A resolução espacial e temporal da IMF depende do NWP adotado. A IMF aplicada para a componente hidrostática é denominada  $IMF_h$  e é estimada para uma altura geopotencial de 200 hPa (Hecto-Pascal), assumindo um gradiente hidrostático a priori conhecido, que corresponde a uma superfície horizontal de aproximadamente 200 km, para um ângulo de elevação de  $3^\circ$ , para um *grid* com espaçamento de  $2^\circ$  em latitude por  $2,5^\circ$  em longitude que corresponde, aproximadamente, a um espaçamento de 200 por 300 km próximo ao equador (NIEEL, 2003; VEY et al., 2006). A  $IMF_h$ , dada em função do ângulo de zenital ( $\xi$ ) e da altura da estação ( $h_e$ ), é expressa pela seguinte relação:

$$m(\xi, h_e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\cos(\xi) + \frac{a}{\cos(\xi) + \frac{b}{\cos(\xi) + c}}} + \left( \frac{1}{\cos(\xi)} - \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}}}{\cos(\xi) + \frac{a_h}{\cos(\xi) + \frac{b_h}{\cos(\xi) + c_h}}} \right) 1,0 \cdot 10^{-3} h_e \quad (61)$$

sendo:

$$a = a_0 + a_1 \cos 2(\varphi - \varphi_a) + (\zeta_0 + \zeta_1 \cos 2(\varphi - \varphi_\zeta)) \cdot (z(\varphi, \lambda) - (z_0 + z_1) \cos 2(\varphi - \varphi_z))$$

$$b = b_0$$

$$c = c_0 + c_1 \cos 2(\varphi - \varphi_c)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 0,00124 & z_1 &= 619,0 \\
 a_1 &= 4.10^{-5} & \varphi_z &= 0,0524 \\
 \varphi_a &= 0,0349 & b_0 &= 0,002905 \\
 a_h &= 2,53.10^{-5} & b_h &= 5,49.10^{-3} \\
 \zeta_0 &= 7,4.10^{-8} & c_0 &= 0,0634 \\
 \zeta_1 &= -1,6.10^{-8} & c_1 &= 0,0014 \\
 \varphi_c &= 0,0 & c_h &= 1,14.10^{-3} \\
 z_0 &= 11836,0 & \varphi_\zeta &= 0,0
 \end{aligned}$$

A IMF para a componente úmida é denotada por IMFw cujos parâmetros são dados por:

$$m(\xi, h_e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{a}{1+c}} \cdot \frac{1}{\cos(\xi) + \frac{a}{\cos(\xi) + \frac{b}{\cos(\xi) + c}}}, \quad (62)$$

sendo:

$$\begin{aligned}
 a &= a_0 + a_1(R - R_0) + \frac{\partial a}{\partial h} h \\
 b &= b_0 + b_1(R - R_0) \\
 c &= c_0 + c_1(R - R_0) \\
 a_0 &= 6,8827.10^{-4} \\
 a_1 &= -2,0795.10^{-4} \\
 \frac{\partial a}{\partial h} &= -1,6580.10^{-3} \\
 b_0 &= 1,3503.10^{-3} \\
 b_1 &= 1,8882.10^{-4} \\
 c_0 &= 3,9647.10^{-2} \\
 c_1 &= 4,8581.10^{-3} \\
 R_0 &= 15,5
 \end{aligned}$$

$R$  será o raio traçado para cada perfil da troposfera. Mais detalhes podem ser encontrados em: <http://gemini.gsfc.nasa.gov/pet/discussion/imf/imf.html/>. A refratividade da componente

úmida é calculada para alturas correspondentes aos níveis de pressão do NWM e para valores de temperatura e umidade específicos (NIELL, 2000).

Os parâmetros hidrostático e úmido são interpolados para a latitude e longitude de cada antena. Devido à pequena variação espacial para a componente hidrostática, em comparação à úmida, esta componente apresenta discrepâncias da ordem de poucos milímetros para as altitudes das estações. Para a  $IMF_w$ , o grid da IMF representa uma aproximação grosseira para descrever com precisão as variações espaciais desta componente, o que conduz à necessidade em se utilizar um NWM com uma maior resolução temporal e espacial (NIELL e PETROV, 2003).

A VMF (*Viena Mapping Function*), por sua vez, introduzida por Boehm e Schuh (2004) para as componentes hidrostática e úmida, baseia-se em raios traçados através de NWM do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), para um ângulo de elevação inicial de 3,3 graus (KOUBA, 2007). A VMF vem fornecendo ótima repetibilidade para as coordenadas das estações, mesmo para linhas de base longas e, além disso, encontra-se implementada em *softwares* científicos como GAMIT/GLOBK contribuindo ao desenvolvimento de inúmeras pesquisas (BOEHM; WERL e SCHUH, 2006 e BOEHM et al., 2005).

Na VMF, os novos coeficientes  $b$  e  $c$  têm sido calculados a partir da IMF com base em dados obtidos por rádiosondas. O coeficiente  $c$  é calculado para cada raio-traçado em função da latitude e dia do ano, visando remover e/ou minimizar erros sistemáticos, o que permite identificar com maior clareza efeitos sazonais (BOEHM et al., 2005). Esta função de mapeamento recentemente melhorada é denominada de VMF1 (BOEHM; WERL e SCHUH, 2006).

Os parâmetros da VMF1 encontram-se disponíveis apenas para algumas estações VLBI desde o ano de 1979 e para algumas estações IGS após o ano de 2004 no endereço: <http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1>, o que conduz a certas limitações na utilização da VMF1. Para compensar tal deficiência a VMF1 apresenta um *grid* global com resolução de 2,0 graus na direção norte-sul e resolução de 2,5 graus na direção leste-oeste, disponibilizado a partir de 2006, o que torna passível sua aplicação em qualquer local e época, após o ano de 2004. Os coeficientes da VMF1 são calculados para as componentes hidrostática e úmida e fornecidos a cada quatro épocas diárias (0, 6, 12, 18 h UT) e armazenados em diretórios anuais (KOUBA, 2007).

Para aplicações menos precisas tem sido utilizado um harmônico esférico global, assim como na NMF, que não necessita de informações externas, denominado GPT (*Global*

*Pressure and Temperature*) (KOUBA, 2007), para tanto basta utilizar como parâmetros de entrada o dia Juliano modificado, a longitude e a latitude da estação, em radianos, e a altura elipsoidal da estação, em metros, obtendo-se os parâmetros: pressão em hPa, temperatura, em graus Celsius, e a ondulação geoidal baseada no modelo EGM (*Earth Gravity Model*).

Análises dos dados da rede GPS global no período de abril de 2004 até março de 2005 aplicando as funções VMF e NMF mostraram uma variação na altura das estações em torno de 10 mm e, ainda, que não há diferenças significativas para a componente úmida. Para ângulos de elevação muito baixos essas diferenças têm se mostrado significativas para a componente hidrostática, contribuindo às variações aparentes na altura das estações (BOEHM et al., 2005).

As soluções com a VMF1 apresentam melhor repetibilidade em especial para a componente altimétrica das estações (uma melhora de 7% quando comparada a NMF). Juntamente com os coeficientes da VMF1 é fornecido o atraso zenital hidrostático derivado do NWP. As diferenças entre os desvios padrão para a componente úmida e hidrostática obtidos com a VMF1 são de 1 e de 0,5 milímetros para as componentes úmida e hidrostática, respectivamente. A maior variação observada para a componente úmida deve-se a sua variabilidade espacial na atmosfera ser mais elevada e mais complexa de ser modelada que na componente hidrostática (BOEHM et al., 2006).

A utilização de funções de mapeamento cujos parâmetros baseiam-se em dados meteorológicos é fortemente recomendada para análises de redes globais, uma vez que promove uma melhora significativa da repetibilidade das coordenadas das estações e, principalmente, por apresentarem uma menor dependência do ângulo de elevação (STEINGENBERGER et al., 2006).

### **3.3 Perdas de Ciclos**

A perda de ciclos (*cycle slip*) ocorre quando o sinal de um ou mais satélites rastreados por um receptor GPS, por exemplo, é interrompido, o que acarreta uma perda na contagem de ciclos acumulados da fase de batimento da onda portadora durante o rastreamento. E, conseqüentemente, introduz um salto, de um número de ciclos inteiros, nas observações após a sua ocorrência. A parte fracionária da fase de batimento da onda portadora não é afetada por esta descontinuidade na contagem dos ciclos (LEICK, 2004).

A ocorrência da perda de ciclos está associada, essencialmente, a obstruções no caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor. Todavia, sua ocorrência pode, ainda, estar associada a outras fontes de erro inerentes ao posicionamento por satélites como o

multicaminho, efeitos atmosféricos, inclinação e variação do centro de fase da antena, problemas de *software* do receptor e mau funcionamento dos relógios dos satélites (SEEBER, 2003; MONICO, 2000 e MACHADO, 2002).

A perda de ciclos pode ocorrer de uma época a outra ou, ainda, durante um intervalo formado por várias épocas. Assim, durante um rastreamento podem ocorrer várias perdas de ciclos, que podem apresentar magnitude de um a milhões de ciclos (LEICK, 2004; MACHADO, 2002). Tais perdas de ciclos podem ser identificadas pelas discontinuidades verificadas no comportamento de séries temporais de medidas de fase, o que permite que possam ser corrigidas das observações e que tenham ainda sua magnitude determinada (MACHADO, 2002).

Neste contexto, cita-se as diversas maneiras utilizadas para identificar as perdas de ciclos como a análise do comportamento de quantidades de épocas adjacentes (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001), a análise dos resíduos da solução da tripla e da dupla diferença utilizando o Filtro de Kalman, em que os parâmetros preditos são comparados com a observação da época atual (LEICK, 2004), aplicar o processo DIA (MACHADO, 2002) e a transformação de *wavelet* (COLLIN e WARNANT<sup>7</sup>, 1995 apud MACHADO, 2002).

Desta forma, quando a perda de ciclos for detectada por algum destes métodos este efeito pode ser corrigido das observações somando-se o número de ciclos que provocou o salto nas observações afetadas. Pode-se, ainda, desconsiderar os dados ou introduzir uma nova ambigüidade como incógnita no modelo de ajustamento (MONICO, 2000; MACHADO, 2002).

### 3.4 Multicaminho

O efeito do multicaminho (*multipath*) ocorre quando um sinal chega à antena receptora por dois, ou mais, caminhos diferentes, em virtude da reflexão deste sinal em superfícies mais ou menos próximas ao receptor como árvores, carros, edifícios entre outros e, ainda, por efeitos secundários causados por reflexões nos próprios satélites e durante a propagação do sinal (MONICO, 2000; HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001; SOUZA, 2004). A ocorrência deste efeito depende da refratividade do meio onde se posiciona a antena e das características da antena e do objeto refletor (SOUZA, 2004).

---

<sup>7</sup> COLLIN, F.; WARNANT, R. Application of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparasion with Kalman Filter, *Manuscripta Geodaetica*, v. 20, p. 1961-172, 1995.

Os efeitos do multicaminho na pseudodistância é cerca de 4 vezes maior (LEICK, 2004) do que na fase da onda portadora, uma vez que o multicaminho distorce a modulação do sinal, tanto para o código C/A quanto para o código P. Assim, a pseudodistância derivada do código C/A apresentará maior erro que a do código P, em razão da magnitude do multicaminho ser dada em função da razão de transmissão de ambos (MONICO, 2000). Segundo Leick (2004), o erro máximo do multicaminho corresponde a 1/4 do comprimento de onda dos sinais GPS.

De acordo com Langley (1996) e Machado (2002), alguns critérios podem ser adotados para minimizar a ocorrência do multicaminho como: critério na seleção do local de instalação da antena; utilização de antenas com padrões que permitam atenuar os sinais refletidos abaixo do horizonte como, por exemplo, as antenas *choke-ring* e, também, utilizar receptores desenvolvidos para identificar este efeito. Mais detalhes podem ser encontrados em Souza (2004).

### 3.5 Rotação da Terra e Movimento do pólo

Como já descrito na Seção 2.2.2, um dos efeitos que afetam o posicionamento por satélites são provocados pelo movimento de rotação da Terra e pelo movimento do pólo de rotação terrestre.

Em virtude do cálculo das coordenadas do satélite no instante de transmissão ser efetuado em um referencial fixo a Terra, torna-se necessário corrigir estas coordenadas do movimento de rotação da Terra, já que durante a propagação do sinal o sistema de coordenadas terrestre rotaciona com relação ao satélite, alterando suas coordenadas (MONICO, 2000).

Desta forma, as coordenadas do satélite devem ser rotacionadas sobre o eixo Z de um ângulo  $\alpha$ , em radianos (aproximadamente igual a  $1,25''$ ), definido como o produto do tempo de propagação pela velocidade de rotação Terra ( $\omega_e$ ):

$$\alpha = \omega_e \tau , \tag{63}$$

onde  $\tau$  é o tempo de propagação do sinal (MONICO, 2000).

Sendo  $X', Y', Z'$  as coordenadas originais do satélite e  $X, Y, Z$  as respectivas coordenadas corrigidas, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & 0 \\ -\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}. \quad (64)$$

O movimento do pólo, como descrito na Seção 2.2.2, também tem influência no posicionamento por satélites, acarretando, principalmente, variações em latitude e longitude. Contudo, este efeito pode ser corrigido das observações  $(x_p, y_p)$  com base nas correções disponibilizadas pelo IERS em seus boletins A e B. Estudos mais aprofundados sobre este assunto são abordados por Müller (1997) e McCarthy (2004).

### 3.6 Marés Terrestres

As deformações elásticas da crosta terrestre, sob a ação gravitacional do Sol e da Lua, é denominada de marés terrestres (*Earth body tides*) (MONICO, 2000). Trata-se de um assunto de grande relevância ao estudo da dinâmica de órbitas, uma vez que este efeito afeta as principais grandezas geodésicas envolvidas em um levantamento de alta precisão (GEMAEL, 1999).

As marés terrestres alteram o potencial gravitacional da Terra e, por conseguinte, acarretam uma aceleração adicional aos satélites da ordem de, aproximadamente,  $2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^2$  alterando, as órbitas dos satélites (SEEBER, 2003). Nas proximidades da região equatorial, a superfície desloca-se, aproximadamente, 40 cm durante um período de 6 horas (BAKER<sup>8</sup>, 1984 apud MONICO, 2000). Estas variações podem ser corrigidas por meio de modelos que se baseiam no movimento dos corpos celestes, calculados com base na latitude do local e podem chegar de 30 cm na componente vertical a 5 cm na componente horizontal. A correção em virtude da influência das marés terrestres pode ser realizada com base no modelo apresentado na Equação 65, (McCARTHY e PETIT, 2004):

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_{\oplus} R_j^3} \left\{ h_2 \cdot \vec{r} \left( \frac{3}{2} (\vec{R}_j \cdot \vec{r})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\vec{R}_j \cdot \vec{r}) \left[ \hat{R}_j - (\vec{R}_j \cdot \vec{r}) \cdot \vec{r} \right] \right\}, \quad (65)$$

sendo:

$\Delta \vec{r}$  - corresponde ao deslocamento;

$GM_{\oplus}$  - constante gravitacional da Terra;

<sup>8</sup> BAKER, T. F. Tidal deformation of the Earth. *Sci. Prog.*, Oxf., v. 69, p.197-233, 1984.

$GM_j$  - constante gravitacional da Lua ( $j = 2$ ) e do Sol ( $j = 3$ );

$\vec{R}_j, R_j$  - são, respectivamente, o vetor unitário do geocentro à Lua ou ao Sol e a magnitude deste;

$\vec{R}_e$  - raio equatorial da Terra;

$\vec{r}_j, r_j$  - são, respectivamente, o vetor unitário do geocentro à estação e a magnitude deste;

$h_2, l_2$  - valores nominais, respectivamente, do número de *LOVE* de grau 2 e do número de *Shida* também de grau 2, que indicam a quantidade de movimento no interior do planeta em resposta à atração luni-solar (WAHR<sup>9</sup>, 1981 apud McCARTHY e PETIT, 2004).

Equações de ordem superior podem ser encontradas em McCarthy e Petit (2004) e maiores detalhes sobre a influência do efeito das marés terrestres no posicionamento por satélites podem ser encontrados em Witchayangkoon (2000).

### 3.7 Carga dos oceanos

A influência ocasionada pela carga das marés oceânicas (*ocean loading*) conduz a uma deformação do piso oceânico e terrestre próxima ao oceano, resultante da redistribuição de massa (água dos oceanos) que se movimenta durante a ocorrência das marés oceânicas (MONICO, 2000). A magnitude do deslocamento depende das características da crosta e das posições do Sol, da Lua e da estação e pode ser calculada por, (McCARTHY e PETIT, 2004):

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}), \quad (66)$$

onde:

$\Delta c$  - corresponde ao deslocamento provocado pela carga dos oceanos;

$A_{cj}$  - refere-se à amplitude;

$\omega_j t$  - velocidade angular da maré;

$\chi_j$  - longitude média do Sol, Lua e perigeu Lunar;

---

<sup>9</sup> Wahr, J. M. *The Forced Nutations of an Elliptical, Rotating, Elastic, and Oceanless Earth*, **Geophys. J. Roy. astr. Soc.**, 64, p. 705–727, 1981.



$f_j$  e  $u_j$  - são os parâmetros dependentes em longitude do nodo lunar;

$A_{cj}$  e  $\Phi_{cj}$  - elementos específicos de cada lugar que refletem a geografia costeira, estrutura elástica e a densidade de um modelo terrestre;

Dentre os modelos existentes para a correção destes efeitos destacam-se: GOT002, o EOT08a e FES2004, cujas correções podem ser obtida, no formato HARPOS e BQL, no endereço: <http://www.oso.chalmers.se/~loading>. No Anexo A, apresenta-se, um exemplo, desta correção no formato BQL, formato utilizado pelo *software* Bernese, para as coordenadas da estação BRAZ. Neste trabalho, será utilizado o modelo global FES2004, desenvolvido por Letellier<sup>10</sup> (2004) apud Lyard et al. (2006), apresenta resolução de 0,125 graus que corresponde a 7,5 km, adotado pelo DGFI em seus critério de combinação de soluções dos IGS-RNAAC-SIR.

### 3.8 Carga da atmosfera

O impacto do efeito da carga da atmosfera sobre as coordenadas da estação é observado, principalmente, na componente altimétrica, onde as maiores deformações estão associadas às tempestades na atmosfera (MONICO, 2000).

Os deslocamentos verticais da crosta podem chegar a 25 mm em regiões de média-latitude devido a sistemas de pressão sinóticos (relacionados às chuvas), onde 1/3 deste valor corresponde aos deslocamentos horizontais. Os maiores deslocamentos são observados para regiões de alta-latitude em virtude das influências climáticas (McCARTHY e PETIT, 2004). Nas Convenções do IERS de 1996 (McCARTHY, 1996) encontra-se uma forma simplificada que permite o cálculo deste deslocamento vertical.

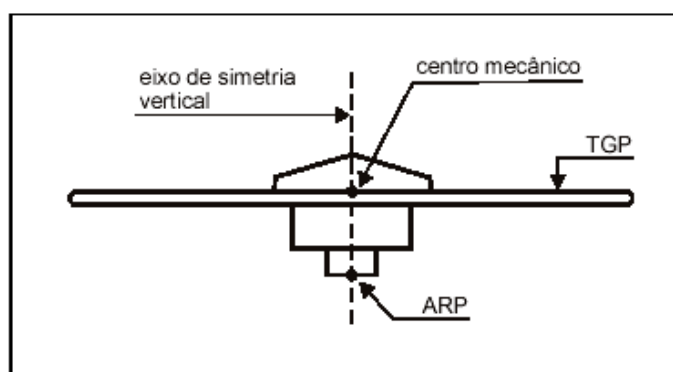
### 3.9 Centro de fase da antena do receptor

A região eletromagnética de uma antena não é homogênea e, além disso, aspectos associados à característica construtiva de cada antena devem ser considerados (WÜBBENA et al., 2000). Assim, para uma antena GPS, por exemplo, a calibração deve descrever a variação do centro de fase nas portadoras L1 e L2, em função do azimute e ângulo de elevação do satélite cujo sinal foi registrado pelo receptor (SEEBER, 2003).

---

<sup>10</sup> LETELLIER, T. *Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux*. 237p. 2004. Thèse doctorale, Université de Toulouse III, Ecole Doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace.

As antenas GPS são dimensionadas de acordo com padrões instrumentais que permitem a identificação dos seus principais componentes como: o eixo de simetria vertical; o ARP (*Antenna Reference Point*), dado pela interseção do eixo de simetria vertical com a parte inferior da antena; o centro mecânico, interseção do eixo de simetria vertical com a parte superior da superfície de proteção contra o multicaminho denominada TGP (*Top ou Ground Plane*), como ilustra a Figura 6:



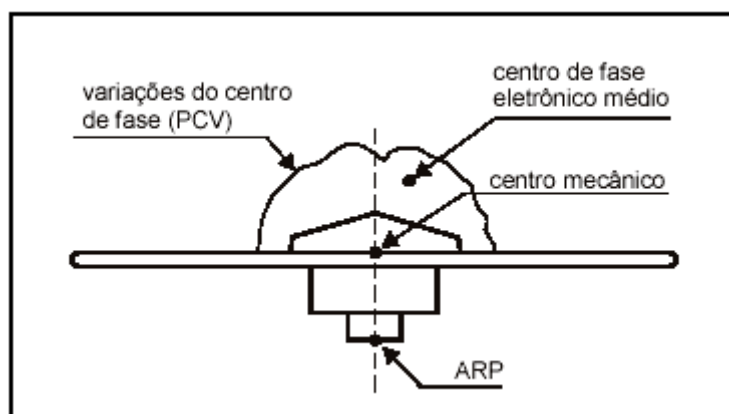
**Figura 6** - Pontos e superfícies de referência de uma antena GPS.  
**Fonte:** Freiberg Junior (2004).

O centro de fase eletrônico ou, simplesmente, centro de fase é o ponto observado em uma antena GPS durante a recepção de um sinal vindo de um satélite, o que implica que a solução geodésica de uma linha de base GPS corresponda ao vetor entre os centros de fase de duas antenas GPS. Nas aplicações de alta precisão, as posições do centro de fase de todas as antenas envolvidas em um projeto devem ser conhecidas e referenciadas em um ponto físico da antena, normalmente ao ARP.

Segundo Seeber (2003), os centros de fase médios nas portadoras L1 e L2 podem apresentar um deslocamento da ordem de milímetros em relação ao centro mecânico da antena, onde se localiza o ARP. A não-coincidência do centro de fase eletrônico, no qual o sinal GPS é efetivamente recebido, com o eixo de simetria, no qual é padronizada a tomada de medição do sinal, é uma característica das antenas GPS, em decorrência das diferenças construtivas de cada antena (CHONG e KAM<sup>11</sup>, 2000, apud FREIBERGER JUNIOR, 2004). Tal deslocamento é denominado *offset* do centro de fase médio, cujas coordenadas tridimensionais em L1 e L2, em relação ao ARP, devem ser fornecidas pelos fabricantes.

<sup>11</sup>CHONG, A. K.; KAM, B. B. (2000). A checking technique for high precision GPS antennas. *Survey Review*, n. 35, 277, p. 464-473.

As PCV das antenas GPS apresentam-se como uma grandeza geométrica de influência direta no posicionamento GPS, em decorrência da alteração da medida de fase e conseqüente alteração da medida de distâncias utilizando-se a fase da onda portadora (AKROUR; SANTERRE e GEIGER, 2005). As PCV, Figura 7, consistem de um deslocamento adicional e sistemático, dependente do ângulo de incidência dos sinais GPS, ou seja, da configuração espacial dos satélites (azimute e ângulo de elevação), (WÜBBENA et al., 2000).



**Figura 7** - Variações do centro de fase e pontos de referência da antena.  
**Fonte:** Freiburger Junior (2004).

No que diz respeito à modelagem das PCV, estas podem ser efetuadas com base em modelos de calibração, o que permite que sejam compensadas no processamento de linhas de base de alta precisão (ROTHACHER e SCHMID<sup>12</sup>, 2002, apud FREIBERGER JUNIOR, 2004). A ausência desta correção conduzirá a variações significativas do centro de fase com a variação da altura do satélite, que combinada ao efeito da refração troposférica, conduz a erros nas medidas, em especial, na componente altimétrica (ROTHACHER, 2001).

O *National Geodetic Survey* (NGS) tem calibrado um grande número de antenas GPS, com a finalidade de disponibilizar correções relativas do centro de fase aos usuários do sistema GNSS que necessitem de alta precisão, possibilitando que diferentes tipos de antenas possam ser combinados com o mínimo efeito na componente altimétrica de estações pertencentes às redes locais e regionais como, por exemplo, *High Precise Positioning Service* (HPPS); *Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung* (SAPOS); e o GNSS (MADER, 2001).

<sup>12</sup> ROTHACHER, M.; SCHMID, R. GPS-Antennenkalibrierungen aus nationaler und internationaler Sicht. In: 4. GPS-Antennenworkshop im Rahmen des 4. SAPOS-symposiums, Hannover, 2002.

No entanto, estas calibrações ou correções relativas são insuficientes quando se trata de bases longas, o que conduz a efeitos significativos nas altitudes das estações (ROTHACHER, 2001). Desta forma, no processamento de linhas de base longas torna-se necessária a utilização de correções absolutas do centro de fase, uma vez que são utilizados diferentes receptores, o que implica que as direções dos sinais coletados simultaneamente sejam diferentes para cada estação e, por isso, diferentes PCV devem ser consideradas (SCHMID et al., 2006).

Nesta perspectiva, tem-se adotado modelos de correção absoluta do centro de fase das antenas (APCV – *Absolute Phase Center Variations*), com base em pesquisas desenvolvidas a partir de 2000 pelo *Institut für Erdmessung*, da Universidade de Hannover, na Alemanha. Segundo Görres et al. (2006), este método de calibração utiliza observações GPS não-diferenciadas de dias siderais médios consecutivos, com a finalidade de se evitar correlações entre as PCV com a estação de calibração ou estação de referência. Este método permite a obter de valores absolutos de *offset*, bem como as APCV com relação ao ângulo de elevação e azimute dos satélites.

A calibração das antenas GPS é, portanto, um tema relevante a inúmeras aplicações geodésicas, o que evidencia a necessidade da compreensão dos diferentes métodos de calibração abordados atualmente na literatura como, por exemplo, os métodos de calibração com base em câmaras anecóicas, calibração relativa e calibração absoluta, adequando-os às necessidades e precisão requerida em cada aplicação (FREIBERGER JUNIOR, 2004). Atualmente, o IGS disponibiliza no endereço [ftp://igs05.jpl.nasa.gov/pub/station/general/igs05\\_1421.atx](ftp://igs05.jpl.nasa.gov/pub/station/general/igs05_1421.atx), uma atualização do arquivo que contém correções absolutas das PCV de diferentes tipos de receptores que compõem a rede GNSS.

### 3.10 Rotação da fase

Os satélites GPS têm a característica de polarizarem as ondas de rádio transmitidas circularmente à direita, o que implica que a observável fase de batimento da onda portadora dependa da orientação tanto das antenas dos satélites quanto das antenas dos receptores (KOUBA e HÉROUX, 2000). Assim, qualquer rotação de uma das antenas em torno de seu próprio eixo conduzirá em variações na fase da portadora da ordem de mais de um ciclo, o que equivale a uma completa revolução da antena (MONICO, 2008). Este efeito é chamado de fase *Wind-up* ou *Wrap-up* (WITCHAYANGKON, 2000). A correção do efeito *Wind-up*

não é aplicada a pseudodistância, uma vez que a distância não se altera com a variação da fase (LEICK, 2004).

Segundo Faustino (2006), a antena mantém sua orientação para uma dada direção de referência, usualmente a direção Norte, porém, a antena do satélite está submetida a lentas rotações em função da direção dos seus painéis solares, que são orientados em relação ao Sol, conduzindo, conseqüentemente, a alterações na geometria estação-satélite. O erro da fase *Wind-up* pode alcançar cerca de meio comprimento de onda.

As antenas dos receptores, por sua vez, são projetadas para receberem os sinais polarizados à direita, o que implica que recebam apenas os sinais percorridos diretamente na trajetória entre o satélite e o receptor, com exceção dos sinais oriundos do multicaminhamento.

Os Centros de Análise do IGS aplicam desde 1994 a correção do efeito *Wind-up* em seus processamentos. No entanto, em geral, este erro é negligenciado nos *softwares*, conduzindo a erros da ordem de decímetros, afetando, principalmente, o processamento de linhas de base longas. Para os casos em que as antenas encontram-se em movimento como no posicionamento cinemático, a fase *Wind-up* é estimada juntamente com a solução do relógio do receptor ou eliminada pela dupla diferença (FAUSTINO, 2006).

### **3.11 Erro do relógio do receptor**

Os receptores GPS, em geral, são equipados com relógios de quartzo, apesar de existirem outros padrões de relógio mais estáveis, porém, de custos muito elevados. Independente da qualidade destes relógios, ambos não se encontram sincronizados com o sistema de tempo GPS, o que implica na necessidade de se rastrear no mínimo 4 satélites para que se possa solucionar, de forma simultânea, a posição da antena receptora e o erro do relógio do receptor (MONICO, 2000). No posicionamento relativo, por sua vez, este erro é minimizado nas DDs (MONICO, 2005).

### **3.12 Atraso no *hardware* do receptor**

A maioria dos receptores geodésicos possuem múltiplos canais, o que contribui para a ocorrência de erros sistemáticos entre estes canais, uma vez que o sinal de cada satélite poderá percorrer caminhos eletrônicos diferentes no *hardware* do receptor. Este erro é corrigido de maneira relativa no próprio *hardware* do receptor, no instante que é inicializado (MONICO, 2005).

Este erro influencia diretamente na medida das observáveis GPS, em especial na pseudodistância, sendo denominados de DCB (*Differential Code Biases*).

### 3.13 Variação temporal das coordenadas devido à Geodinâmica

De acordo com a teoria da Tectônica das Placas, a Litosfera é composta pela crosta terrestre e por placas rígidas flutuando sobre o manto fluido e viscoso, logo abaixo da crosta terrestre, denominadas placas litosféricas (TURCOTTE e SCHUBERT<sup>13</sup>, 2002 apud FAUSTINO, 2006). Essas placas se movem continuamente em diferentes magnitudes e direções, de acordo com a direção em que encontram-se localizadas. Com o movimento das placas litosféricas, as coordenadas geodésicas dos pontos sobre a superfície terrestre variam com o tempo, tornando-se dependentes da época em que foram determinadas. Portanto, conhecendo-se os elementos que definem estes movimentos, torna-se possível estimar as variações nas coordenadas em função do tempo (COSTA, 1999).

Existem, atualmente, alguns modelos disponíveis que permitem estimar os movimentos das placas litosféricas tais como: NNR-NUVEL 1A (*No Net Rotation – Northwestern University VELOCITY model 1A*); APKIM 2002 (*Actual Plate Kinematic Model*); Perez (2002) (FAUSTINO et al., 2005).

---

<sup>13</sup> TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT, G. *Geodynamics*. 2.ed. Cambridge, 2002. 456p.

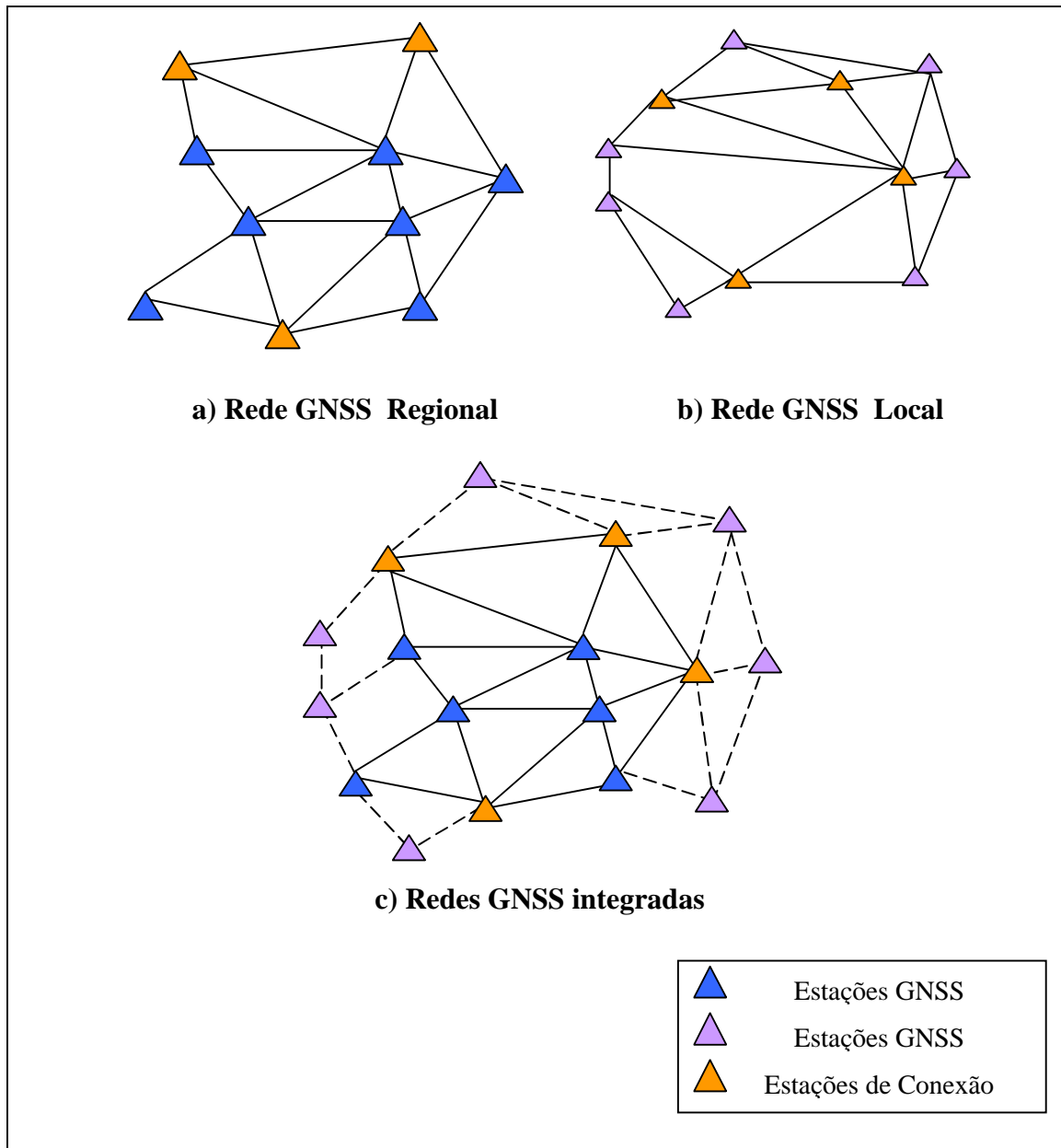
#### 4 INTEGRAÇÃO DE REDES

A estrutura de uma rede geodésica pode ser caracterizada por um conjunto de pontos materializados no terreno e conectados entre si, cujas posições foram determinadas por meio de observações e cálculos rigorosos. Isto possibilita a utilização destes resultados em diferentes aplicações geodésicas que necessitem de alta precisão como: monitoramento de movimentos da crosta terrestre (níveis globais, regionais ou locais); controle e segurança de estruturas, estudos relacionados à ionosfera, agricultura de precisão, redes geodésicas de alta precisão passivas ou ativas, entre outros.

No que concerne ao estabelecimento de redes geodésicas, a integração é considerada, em um sentido mais amplo, como a estrutura mínima necessária ao estabelecimento de futuros levantamentos, que podem ser adicionados a redes geodésicas já existentes a partir de métodos de ajustamento, ou ainda por processos de densificação de redes.

Dentre as formas de integração existentes pode-se citar a conexão entre sistemas de referência terrestres de mesma natureza ou de concepções distintas (geocêntrico e topocêntrico), com base no ajustamento de redes ou por meio de órbitas GPS (transmitidas e precisas) ou, ainda, com base em modelagens de transformação (transformação de similaridade) e distorção provenientes das materializações dos sistemas de referência, visando a integração entre esses sistemas no contexto nacional ou internacional. Neste contexto pode-se citar, como exemplo, a integração do SGB ao SIRGAS, com base nas estações que compõem a RBMC (IBGE, 2009; COSTA, 1999); a conexão entre as redes SIRGAS e ITRS, através da utilização de produtos ITRF/IGS (efemérides precisas e coordenadas); a integração da rede ITESP (Instituto de Terras do Estado de São Paulo) ao SGB (MARINI, 2002), e a combinação entre soluções intra-técnica, ou seja, utilizando soluções obtidas por apenas um único tipo de técnica de posicionamento espacial (intra-técnica) ou por diferentes técnicas espaciais (inter-técnica) como GPS, VLBI, SLR, LLR, DORIS (ROTACHER, 2002).

Neste trabalho, o termo integração de redes refere-se à densificação de uma rede geodésica regional a partir do estabelecimento de redes geodésicas locais, como ilustra a Figura 8:



**Figura 8** – Processo de integração e densificação de redes geodésicas.

Para tanto, vértices com coordenadas conhecidas no referencial a ser densificado (estações de conexão), Figura (a), farão parte da rede a ser integrada, Figura (b), e serão introduzidos como injunções no ajustamento, Figura (c), como ilustra esquematicamente a Figura 8. Desta forma, será apresentado o ajustamento das redes geodésicas GNSS utilizando-se o conceito de ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para sistemas não lineares aplicando o método paramétrico com a inclusão de novas observações e parâmetros, com base na combinação das equações normais. Maiores detalhes podem ser encontrados em Seeber (2003), Gemael (1994), Vaniceck & Krakiwsky (1986), entre outros.



#### 4.1 Princípio do Método dos Mínimos Quadrados

Para a obtenção de uma solução única para um determinado modelo e um conjunto de  $n$  observações o princípio do MMQ estabelece que a soma do quadrado dos resíduos ponderados seja mínima:

$$\phi = V^T P V = \min , \quad (67)$$

onde  $V$  o vetor dos resíduos das observações de ordem  $(n \times 1)$  e  $P$  a matriz do peso das observações de ordem  $(n \times n)$  dada por:

$$P = \sigma_0^2 \sum_{L_b}^{-1} , \quad (68)$$

sendo  $\sigma_0^2$  um escalar conhecido como fator de variância a priori, escolhido arbitrariamente, e  $\sum_{L_b}$  é a MVC das observações, expressa por:

$$\sum_{L_b} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} . \quad (69)$$

formada pelas variâncias ( $\sigma_i^2$ ) e covariâncias ( $\sigma_{ij}$ ).

O ajustamento pelo método do MMQ produz estimativas atualizadas (ajustadas) de todos os parâmetros do modelo, bem como de suas respectivas precisões (MVC). Além disso, possibilita atualizar uma solução com a inserção de novas observações, que serão introduzidas como valores incógnitos, ou seja, parâmetros no ajustamento.

#### 4.2 Ajustamento pelo Método Paramétrico

O método paramétrico também conhecido como ajustamento de observações indiretas ou método das equações de observação, baseia-se no seguinte modelo matemático:

$$L_a = F(X_a) , \quad (70)$$

onde:

$L_a$  - vetor das observações ajustadas de ordem  $(n \times 1)$ ;

$X_a$  - vetor dos parâmetros ajustados de ordem  $(u \times 1)$ ; e,

$F$  - função que relaciona  $L_a$  e  $X_a$  podendo ser ou não linear.

O modelo linearizado do MMQ, considerando-se  $n$  observações e  $u$  parâmetros é descrito pelo seguinte sistema matricial:

$$V = AX + L, \quad (71)$$

onde  $A$  é matriz *design* ou matriz jacobina de ordem  $(n \times u)$ ;  $X$  é o vetor das correções aos parâmetros aproximados de ordem  $(u \times 1)$ ,  $V$  o vetor dos resíduos das observações de ordem  $(n \times 1)$  e  $L_b$  é o vetor das observações de ordem  $(n \times 1)$ :

$$L = L_a + V, \quad (72)$$

em que  $L$   $(n \times 1)$  é o vetor das observações ajustadas, subtraído das observações calculadas em função dos parâmetros aproximados

$$L = L_0 - L_b, \quad (73)$$

onde  $L_0 = F(X_0)$ .

Substituindo a Equação 71 na Equação 67 tem-se que:

$$\begin{aligned} \phi &= (AX + L)^T P (AX + L) = \min \\ \phi &= (X^T A^T + L^T) P (AX + L) = \min \\ \phi &= (X^T A^T P + L^T P) (AX + L) = \min \\ \phi &= X^T A^T P A X + X^T A^T P L + L^T P A X + L^T P L = \min \end{aligned} \quad (74)$$

onde  $X^T A^T P L = L^T P A X$ , o que resulta na forma quadrática fundamental do MMQ dada por:

$$\phi = X^T A^T P A X + 2X^T A^T P L + L^T P L = \min. \quad (75)$$

Denotando  $N = A^T P A$  e  $U = A^T P L$  e derivando-se a Equação 75 em relação à  $X$  e igualando-a a zero tem-se que:

$$\frac{d\phi}{dX} = 2A^T P A X + 2A^T P L = 0$$

$$A^T PAX + A^T PL = 0 \Rightarrow NX + U = 0 \quad (76)$$

onde:

$N$  - matriz dos coeficientes das equações normais de ordem  $(u \times u)$ ;

$U$  - vetor dos termos independentes de ordem  $(u \times 1)$ .

Admitindo-se que  $N$  é uma matriz não singular, o vetor das correções aos parâmetros aproximados pode ser obtido por:

$$X = -N^{-1}U. \quad (77)$$

Nesta perspectiva, somando-se as componentes do vetor  $X$   $(u \times 1)$  aos parâmetros aproximados  $X_0$ , verifica-se que a solução do ajustamento será dada por:

$$X_a = X_0 + X, \quad (78)$$

onde  $X_a$  é o vetor dos parâmetros ajustados  $(u \times 1)$ ;  $X_0$  corresponde ao vetor dos parâmetros aproximados  $(u \times 1)$ .

Posteriormente ao ajustamento, calcula-se o fator de variância a posteriori dado por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T PV}{n - u}. \quad (79)$$

Caso o ajustamento tenha sido aceito no teste estatístico utilizado,  $\hat{\sigma}_0^2$  representará um estimador não tendencioso de  $\sigma_0^2$ , o que implica as MVCs dos parâmetros ajustados ( $\sum X_a$ ), das observações ajustadas ( $\sum L_a$ ) e dos resíduos ( $\sum V$ ) possam ser estimadas:

$$\begin{aligned} \sum X_a &= \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \\ \sum L_a &= \hat{\sigma}_0^2 AN^{-1}A^T \\ \sum V &= \hat{\sigma}_0^2 (P^{-1} - AN^{-1}A^T) \end{aligned} \quad (80)$$

Considerando-se  $n$  conjuntos de observações, obtidos em épocas distintas, obtêm-se o vetor dos parâmetros incógnitos dado por:

$$X = -(N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n)^{-1}(U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n) \quad (81)$$

Verifica-se, com base na Equação 81 que o vetor dos parâmetros incógnitos em um ajustamento envolvendo  $n$  conjuntos de observações, será dado pelo somatório entre as equações normais geradas por cada conjunto de parâmetros. Assim, basta calcular os parâmetros ajustados com base na Equação 78 e, posteriormente, calcular a MVC destes parâmetros dada por:

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 (N_1 + N_2 + N_3 + N_n)^{-1} \quad (82)$$

#### 4.2.1 Introdução de novas observações e parâmetros no ajustamento pelo método paramétrico

Segundo Gemael (1994), considerando-se a inclusão de novas observações e parâmetros tem-se os seguintes vetores de observações envolvidos no ajustamento pelo método paramétrico:

$$\begin{aligned} L_1^a &= F_1(X_1^a) \\ L_2^a &= F_2(X_1^a, X_2^a) \end{aligned} \quad (83)$$

Neste caso, os modelos formam um sistema de  $n$  equações de condição ( $n_1 + n_2$ ), que devem ser linearizadas em função dos mesmos valores aproximados ( $X_1^0, X_2^0$ ):

$$\begin{aligned} A_1 X_1 + L_1 &= V_1 \\ A_2 X_1 + \bar{A}_2 X_2 + L_2 &= V_2 \end{aligned} ; \quad (84)$$

onde:  $X_i = X_i^a - X_i^0$ ;  $L_i^a = L_i^0 - L_i^b$ ;  $V_i = L_i^a - L_i^b$ , com  $i = 1, \dots, n$  sendo  $L_i^0$  igual a:

$$\begin{aligned} L_1^0 &= F_1(X_1^0) \\ L_2^0 &= F_2(X_1^0, X_2^0) \end{aligned} \quad (85)$$

e as matrizes *design*  $A_i$  serão dadas por:

$$A_1 = \left. \frac{\partial F_1}{\partial X_1^a} \right|_{X_1^0} ; A_2 = \left. \frac{\partial F_2}{\partial X_1^a} \right|_{X_1^0} ; \bar{A}_2 = \left. \frac{\partial F_2}{\partial X_2^a} \right|_{X_2^0} . \quad (86)$$

Nesta etapa as informações das novas estações e das estações de controle são introduzidas adicionalmente no conjunto de observações que compõem o ajustamento. Como forma de simplificação, considerando-se 2 conjuntos de observação, tem-se que a forma a ser minimizada é dada por:

$$\phi = V_1^T P_1 V_1 + V_2^T P_2 V_2 - 2K_1^T (A_1 X_1 + L_1 - V_1) - 2K_2^T (A_2 X_1 + \bar{A}_2 X_2 + L_2 - V_2) = \min \quad (87)$$

Deste modo, derivando-se a função (Equação 87) em relação a  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $K_1$  e  $K_2$ , tem-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial V_1} = P_1 V_1 - K_1 \quad (88)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial V_2} = P_2 V_2 - K_2 \quad (89)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X_1} = A_1^T K_1 + A_2^T K_2 \quad (90)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X_2} = \bar{A}_2 K_2 \quad (91)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial K_1} = A_1 X_1 + L_1 - V_1 \quad (92)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial K_2} = A_2 X_1 + \bar{A}_2 X_2 + L_2 - V_2 \quad (93)$$

Igualando as derivadas parciais acima a zero e isolando-se  $V_1$  e  $V_2$  nas Equações 88 e 89, obtém-se as seguintes relações:

$$V_1 = P_1^{-1} K_1, \quad (94)$$

$$V_2 = P_2^{-1} K_2, \quad (95)$$

que substituídas nas Equações 92 e 93, tem-se juntamente com as Equações 90 e 91, o seguinte sistema reduzido formado pelas seguintes Equações:

$$\begin{aligned} A_1 X_1 + L_1 - P_1^{-1} K_1 &= 0, \\ A_2 X_1 + \bar{A}_2 X_2 + L_2 - P_2^{-1} K_2 &= 0, \\ A_1^T K_1 + A_2^T K_2 &= 0 \\ \bar{A}_2 K_2 &= 0 \end{aligned} \quad (96)$$

Isolando  $K_1$  na primeira Equação do sistema acima:

$$K_1 = P_1(A_1 X + L_1), \quad (97)$$

e substituindo-o na terceira Equação, obtém-se um novo sistema de Equações reduzido:

$$A_1^T P_1 A_1 X_1 + A_1^T P_1 L_1 + A_2^T K_2 = 0, \quad (98)$$

$$A_2 X_1 + \bar{A}_2 X_2 + L_2 - P_2^{-1} K_2 = 0, \quad (99)$$

$$\bar{A}_2^T K_2 = 0. \quad (100)$$

Reescrevendo a Equação 98 em função de suas equações normais, como forma de simplificação, tem-se:

$$N_1 X_1 + U_1 + A_2^T K_2 = 0, \quad (101)$$

o que implica que  $X_1$  seja denotado por:

$$X_1 = -N_1^{-1} U_1 - N_1^{-1} A_2^T K_2 = 0. \quad (102)$$

Na Equação 102 o primeiro termo refere-se a solução do primeiro conjunto de observações ( $X_1^*$ ), enquanto que o segundo à influência do novo conjunto de observações sobre o primeiro ( $\delta X$ ). Desta forma, a Equação 102 pode ser reescrita como:

$$X_1 = X_1^* + \delta X. \quad (103)$$

### 4.3 Modelos matemáticos envolvidos no processo de integração de redes geodésicas

No processamento e ajuste de redes geodésicas de alta precisão, o método de posicionamento empregado é o relativo estático, descrito no Capítulo 3, utilizando as equações de observação de fase e/ou pseudodistância. No pré-processamento dos dados, em geral, aplica-se o modelo da Tripla Diferença (MONICO, 2008) para a fase com o intuito de se detectar *outliers* e corrigir perdas de ciclo. No processamento, são aplicados os modelos das DDs das observáveis GPS para corrigir erros comuns às estações.

Desta forma, considerando-se apenas as observações de fase, como forma de simplificação, e desprezando-se a influência dos efeitos da ionosfera, da troposfera e do multicaminho, entre duas estações  $A$  e  $B$  e os satélites  $i, j$ , tem-se que a DD da fase, em metros, é expressa por:

$$\lambda \Delta \phi_{A,B}^{i,j}(t) = \Delta \rho_{A,B}^{i,j}(t) + \lambda \Delta N_{A,B}^{i,j}. \quad (104)$$

Aplicando-se a linearização pela série de Taylor para a distância geométrica entre um satélite ( $s$ ) e um receptor ( $r$ ), de coordenadas aproximadas conhecidas:

$$f(X_r, Y_r, Z_r) = f(X_r^0, Y_r^0, Z_r^0) + \frac{\partial f(X_r^0, Y_r^0, Z_r^0)}{\partial X_r^0} \Delta X_r + \frac{\partial f(X_r^0, Y_r^0, Z_r^0)}{\partial Y_r^0} \Delta Y_r + \frac{\partial f(X_r^0, Y_r^0, Z_r^0)}{\partial Z_r^0} \Delta Z_r + \dots \quad (105)$$

obtem-se a distância geométrica linearizada, que é dada por:

$$\rho_r^s(t) = \rho_{r^0}^s(t) - \frac{X^s(t) - X_{r^0}}{\rho_{r^0}^s(t)} \Delta X_r - \frac{Y^s(t) - Y_{r^0}}{\rho_{r^0}^s(t)} \Delta Y_r - \frac{Z^s(t) - Z_{r^0}}{\rho_{r^0}^s(t)} \Delta Z_r + \dots \quad (106)$$

onde:  $\rho_{r^0}^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_{r^0})^2 + (Y^s(t) - Y_{r^0})^2 + (Z^s(t) - Z_{r^0})^2}$ .

Substituindo a Equação 106 no termo  $\Delta \rho_{i,j}^{m,n}$  (Equação 104) obtém-se a seguinte relação:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{A,B}^{i,j} = & \rho_B^j(t) - \frac{X^j - X_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j - Y_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j - Z_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} \Delta Z_B - \\ & \rho_A^j(t) - \frac{X^j - X_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} \Delta X_A - \frac{Y^j - Y_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} \Delta Y_A - \frac{Z^j - Z_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} \Delta Z_A - \\ & \rho_B^i(t) - \frac{X^i - X_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \Delta X_B - \frac{Y^i - Y_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^i - Z_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \Delta Z_B + \\ & \rho_A^i(t) - \frac{X^i - X_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \Delta X_A - \frac{Y^i - Y_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \Delta Y_A - \frac{Z^i - Z_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \Delta Z_A \end{aligned} \quad (107)$$

Agrupando-se os termos em comum tem-se que:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{A,B}^{i,j} = & \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - \rho_B^i(t) + \rho_A^i(t) + \\ & \left[ -\frac{X^j - X_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} + \frac{X^i - X_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \right] \Delta X_B + \left[ \frac{X^j - X_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} - \frac{X^i - X_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \right] \Delta X_A + \\ & \left[ -\frac{Y^j - Y_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} + \frac{Y^i - Y_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \right] \Delta Y_B + \left[ \frac{Y^j - Y_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} - \frac{Y^i - Y_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \right] \Delta Y_A + \\ & \left[ -\frac{Z^j - Z_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} + \frac{Z^i - Z_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \right] \Delta Z_B + \left[ \frac{Z^j - Z_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} - \frac{Z^i - Z_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \right] \Delta Z_A \end{aligned} \quad (108)$$

Como forma de simplificação, denota-se os termos em comum da Equação 108 como segue:

$$\begin{aligned}
 a_{X_B}^{i,j} &= \left[ -\frac{X^j - X_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} + \frac{X^i - X_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \right]; \quad a_{X_A}^{i,j} = \left[ -\frac{X^j - X_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} + \frac{X^i - X_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \right]; \\
 a_{Y_B}^{i,j} &= \left[ -\frac{Y^j - Y_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} + \frac{Y^i - Y_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \right]; \quad a_{Y_A}^{i,j} = \left[ -\frac{Y^j - Y_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} + \frac{Y^i - Y_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \right]; \\
 a_{Z_B}^{i,j} &= \left[ -\frac{Z^j - Z_{B^0}}{\rho_{B^0}^j(t)} + \frac{Z^i - Z_{B^0}}{\rho_{B^0}^i(t)} \right]; \quad a_{Z_A}^{i,j} = \left[ -\frac{Z^j - Z_{A^0}}{\rho_{A^0}^j(t)} + \frac{Z^i - Z_{A^0}}{\rho_{A^0}^i(t)} \right];
 \end{aligned} \tag{109}$$

Desta forma, a Equação 108 pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
 \Delta\rho_{A,B}^{i,j} &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - \rho_B^i(t) + \rho_A^i(t) + a_{X_B}^{i,j}\Delta X_B + a_{X_A}^{i,j}\Delta X_A + a_{Y_B}^{i,j}\Delta Y_B + \\
 &\quad a_{Y_A}^{i,j}\Delta Y_A + a_{Z_B}^{i,j}\Delta Z_B + a_{Z_A}^{i,j}\Delta Z_A
 \end{aligned} \tag{110}$$

Substituindo-se a Equação 110 na Equação 104, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 \lambda\Delta\phi_{A,B}^{i,j}(t) &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - \rho_B^i(t) + \rho_A^i(t) + a_{X_B}^{i,j}\Delta X_B + a_{X_A}^{i,j}\Delta X_A + a_{Y_B}^{i,j}\Delta Y_B + \\
 &\quad a_{Y_A}^{i,j}\Delta Y_A + a_{Z_B}^{i,j}\Delta Z_B + a_{Z_A}^{i,j}\Delta Z_A + \lambda\Delta N_{A,B}^{i,j}
 \end{aligned} \tag{111}$$

Isolando-se os parâmetros na Equação 111, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 \lambda\Delta\phi_{A,B}^{i,j}(t) - \rho_B^j(t) + \rho_B^i(t) + \rho_A^j(t) - \rho_A^i(t) &= a_{X_B}^{i,j}\Delta X_B + a_{X_A}^{i,j}\Delta X_A + \\
 &\quad a_{Y_B}^{i,j}\Delta Y_B + a_{Y_A}^{i,j}\Delta Y_A + a_{Z_B}^{i,j}\Delta Z_B + a_{Z_A}^{i,j}\Delta Z_A + \lambda\Delta N_{A,B}^{i,j}
 \end{aligned} \tag{112}$$

Considerando-se uma rede geodésica constituída por “ $r$ ” receptores e considerando-se “ $s$ ” satélites rastreados em “ $n$ ” épocas distintas, tem-se que o vetor das observações formados entre as DD de fase, tomando o satélite 1 como satélite base, tem-se que o vetor do conjunto de observações será dado por:

$$L_b = [\Delta\phi_{1,2}^{1,2}(t_1), \Delta\phi_{1,2}^{1,3}(t_1), \dots, \Delta\phi_{1,2}^{1,s}(t_1), \dots, \Delta\phi_{1,r}^{1,2}(t_1), \Delta\phi_{1,r}^{1,3}(t_1), \dots, \Delta\phi_{1,r}^{1,s}(t_1), \Delta\phi_{1,2}^{1,2}(t_2),$$



$$\begin{aligned} & \Delta\phi_{1,2}^{1,3}(t_2), \dots, \Delta\phi_{1,2}^{1,s}(t_2), \dots, \Delta\phi_{1,r}^{1,2}(t_2), \Delta\phi_{1,r}^{1,3}(t_2), \dots, \Delta\phi_{1,r}^{1,s}(t_2), \dots, \Delta\phi_{1,2}^{1,2}(t_n), \\ & \Delta\phi_{1,2}^{1,3}(t_n), \dots, \Delta\phi_{1,2}^{1,s}(t_n), \dots, \Delta\phi_{1,r}^{1,2}(t_n), \Delta\phi_{1,r}^{1,3}(t_n), \dots, \Delta\phi_{1,r}^{1,s}(t_n)] \end{aligned} \quad (113)$$

onde  $\Delta\phi_{1,r}^{1,s}(t) = \phi_{1,r}^s(t) - \phi_{1,r}^1(t)$ . Nesta perspectiva, a MVC do conjunto de observações ( $\sum L_b$ ) será definida pela precisão de cada observação ( $\sigma^2\phi_{1,s}^{1,r}(t)$ ) e pela correlação existente entre esse conjunto de observações ( $\sigma(\phi_{1,r}^{1,s}(t), \phi_{1,r}^{1,s-1}(t))$ ) em uma determinada época. Adotando-se a mesma precisão para  $L_b$  (Equação 113) e aplicando-se a lei de propagação de covariâncias para as DDs obtida na Equação 27, obtém-se a  $\sum L_b$  do conjunto de observações:

$$\sum L_b = \begin{bmatrix} 4\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi & \dots & 2\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi \\ & 4\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi & \dots & 2\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi \\ & & 4\sigma^2\phi & \dots & 2\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi \\ & & & \dots & 2\sigma^2\phi & 2\sigma^2\phi \\ & & & & \dots & 2\sigma^2\phi \\ & & & & & 4\sigma^2\phi \end{bmatrix}. \quad (114)$$

Portanto, a MVC das DDs com base no conjunto de observações (Equação 113), considerando-se, como forma de exemplificação, a formação de linhas de base independentes para uma rede constituída por 3 receptores rastreando simultaneamente 4 satélites em 3 épocas distintas, será dada por:

$$\sum_{DD_i} = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 4 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 4 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 4 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (115)$$

Verifica-se que a MVC das DDs é constituída por blocos diagonais, uma vez que as DDs de diferentes épocas não são correlacionadas. Desta forma obtém-se a matriz Peso (Equação 68) do conjunto de observações:

$$P = \sigma_0^2 \sum_{DD_i}^{-1} \quad (116)$$

O vetor dos parâmetros incógnitos será dado por:

$$X_a = [\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta Z_1, \Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2, \dots, \Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, \Delta N_{1,2}^{1,2}, \Delta N_{1,2}^{1,3}, \dots, \Delta N_{1,2}^{1,s}, \dots, \Delta N_{1,r}^{1,2}, \Delta N_{1,r}^{1,3}, \dots, \Delta N_{1,r}^{1,s}] \quad (117)$$

onde  $\Delta X_r = X_r - X_{r^0}$ .

A matriz *design*  $A$  (matriz Jacobiana), será dada pelas derivadas parciais em relação as componentes  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  de cada estação. Logo, utilizando-se as simplificações da Equação 109, tem-se que matriz dos coeficientes será dada por:

$$A = \begin{bmatrix}
a_{X_1}^{1,2}(t_1) & a_{Y_1}^{1,2}(t_1) & a_{Z_1}^{1,2}(t_1) & a_{X_2}^{1,2}(t_1) & a_{Y_2}^{1,2}(t_1) & a_{Z_2}^{1,2}(t_1) & \cdots & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,3}(t_1) & a_{Y_1}^{1,3}(t_1) & a_{Z_1}^{1,3}(t_1) & a_{X_2}^{1,3}(t_1) & a_{Y_2}^{1,3}(t_1) & a_{Z_2}^{1,3}(t_1) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,s}(t_1) & a_{Y_1}^{1,s}(t_1) & a_{Z_1}^{1,s}(t_1) & a_{X_2}^{1,s}(t_1) & a_{Y_2}^{1,s}(t_1) & a_{Z_2}^{1,s}(t_1) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,2}(t_1) & a_{Y_1}^{1,2}(t_1) & a_{Z_1}^{1,2}(t_1) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,2}(t_1) & a_{Y_r}^{1,2}(t_1) & a_{Z_r}^{1,2}(t_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,3}(t_1) & a_{Y_1}^{1,3}(t_1) & a_{Z_1}^{1,3}(t_1) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,3}(t_1) & a_{Y_r}^{1,3}(t_1) & a_{Z_r}^{1,3}(t_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\
a_{X_1}^{1,s}(t_1) & a_{Y_1}^{1,s}(t_1) & a_{Z_1}^{1,s}(t_1) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,s}(t_1) & a_{Y_r}^{1,s}(t_1) & a_{Z_r}^{1,s}(t_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \\
a_{X_1}^{1,2}(t_2) & a_{Y_1}^{1,2}(t_2) & a_{Z_1}^{1,2}(t_2) & a_{X_2}^{1,2}(t_2) & a_{Y_2}^{1,2}(t_2) & a_{Z_2}^{1,2}(t_2) & \cdots & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,3}(t_2) & a_{Y_1}^{1,3}(t_2) & a_{Z_1}^{1,3}(t_2) & a_{X_2}^{1,3}(t_2) & a_{Y_2}^{1,3}(t_2) & a_{Z_2}^{1,3}(t_2) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,s}(t_2) & a_{Y_1}^{1,s}(t_2) & a_{Z_1}^{1,s}(t_2) & a_{X_2}^{1,s}(t_2) & a_{Y_2}^{1,s}(t_2) & a_{Z_2}^{1,s}(t_2) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,2}(t_2) & a_{Y_1}^{1,2}(t_2) & a_{Z_1}^{1,2}(t_2) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,2}(t_2) & a_{Y_r}^{1,2}(t_2) & a_{Z_r}^{1,2}(t_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,3}(t_2) & a_{Y_1}^{1,3}(t_2) & a_{Z_1}^{1,3}(t_2) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,3}(t_2) & a_{Y_r}^{1,3}(t_2) & a_{Z_r}^{1,3}(t_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\
a_{X_1}^{1,s}(t_2) & a_{Y_1}^{1,s}(t_2) & a_{Z_1}^{1,s}(t_2) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,s}(t_2) & a_{Y_r}^{1,s}(t_2) & a_{Z_r}^{1,s}(t_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
a_{X_1}^{1,2}(t_n) & a_{Y_1}^{1,2}(t_n) & a_{Z_1}^{1,2}(t_n) & a_{X_2}^{1,2}(t_n) & a_{Y_2}^{1,2}(t_n) & a_{Z_2}^{1,2}(t_n) & \cdots & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,3}(t_n) & a_{Y_1}^{1,3}(t_n) & a_{Z_1}^{1,3}(t_n) & a_{X_2}^{1,3}(t_n) & a_{Y_2}^{1,3}(t_n) & a_{Z_2}^{1,3}(t_n) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,s}(t_n) & a_{Y_1}^{1,s}(t_n) & a_{Z_1}^{1,s}(t_n) & a_{X_2}^{1,s}(t_n) & a_{Y_2}^{1,s}(t_n) & a_{Z_2}^{1,s}(t_n) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,2}(t_n) & a_{Y_1}^{1,2}(t_n) & a_{Z_1}^{1,2}(t_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,2}(t_n) & a_{Y_r}^{1,2}(t_n) & a_{Z_r}^{1,2}(t_n) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,3}(t_n) & a_{Y_1}^{1,3}(t_n) & a_{Z_1}^{1,3}(t_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,3}(t_n) & a_{Y_r}^{1,3}(t_n) & a_{Z_r}^{1,3}(t_n) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\
a_{X_1}^{1,s}(t_n) & a_{Y_1}^{1,s}(t_n) & a_{Z_1}^{1,s}(t_n) & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{X_r}^{1,s}(t_n) & a_{Y_r}^{1,s}(t_n) & a_{Z_r}^{1,s}(t_n) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda
\end{bmatrix} \quad (118)$$

Com base na matriz  $A$  (Equação 118), na matriz Peso (Equação 116) e no vetor de observações (Equação 113), obtém-se as equações normais  $N_L$  ( $u \times u$ ) e  $U_L$  ( $u \times 1$ ) da rede local, com base na relação matemática expressa na Equação 97.

Posteriormente, para realizar a integração dessas soluções com uma determinada solução regional torna-se necessária a reconstrução das equações normais a partir das informações contidas nos arquivos SINEX da rede regional, como fator de variância a posteriori ( $\hat{\sigma}_0^2$ ), conjunto de parâmetros ajustados ( $X_a^R$ ) e aproximados ( $X_0^R$ ), MVC dos parâmetros ajustados ( $\sum X_a$ ), bem como de um número mínimo de estações comuns a ambas as redes. Ressalta-se que, embora seja possível definir um *datum* com apenas uma

estação, torna-se necessário, neste trabalho, um número maior de estações para a eliminação de erros grosseiros e para que haja redundância no ajustamento.

Nesta perspectiva, torna-se possível a reconstrução das equações normais da rede regional. Com base na  $\sum X_a$  e no  $\hat{\sigma}_0^2$  obtém-se a  $N_R$  da rede regional:

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 N_R^{-1} \Rightarrow N_R = \hat{\sigma}_0^2 \sum X_a^{-1} . \quad (119)$$

E, a partir dos conjuntos de  $X_a$  e  $X_0$  obtém-se o vetor  $X_R$ :

$$X_a^R = X_0^R + X_R \Rightarrow X_R = X_a^R - X_0^R , \quad (120)$$

com base no qual torna-se possível obter a matriz  $U_R$  pela seguinte Equação:

$$X_R = -N_R^{-1} U_R . \quad (121)$$

Multiplicando-se ambos os lados da Equação 121 por  $N_R$  tem-se:

$$N_R X_R = -N_R^{-1} N_R U_R \Rightarrow U_R = -N_R X_R , \quad (122)$$

onde  $N_R^{-1} N_R$  é igual a matriz identidade ( $I$ ).

Com essas informações, a integração entre redes de naturezas distintas pode ser realizada em termos de suas equações normais obtidas, respectivamente, do processamento dos dados GPS e dos arquivos SINEX obtidos semanalmente, com base nos processamentos realizados pelos Centros de Análise SIRGAS. Para tanto, tais soluções devem estar livres de injunções, caso contrário acarretará em uma solução super-injuncionada. No processo de combinação de redes, em geral, o número de estações envolvidas à cada época varia, o que conduz a necessidade de se expandir o sistema de equações normais, alocando-se zeros nas linhas e colunas correspondentes aos respectivos parâmetros.

Portanto, com base em uma série temporal obtida a partir de várias soluções semanais, em uma determinada época de referência ( $t_0$ ), pode-se estimar as coordenadas de um conjunto de estações e suas respectivas velocidades, em uma determinada época  $t$ , com base em um conjunto de vetores-posição  $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}$  e suas respectivas MVCs, ( $\sum X_{i=t_1, t_2, \dots, t_n}$ ), a partir de  $n$  observações, ou seja:

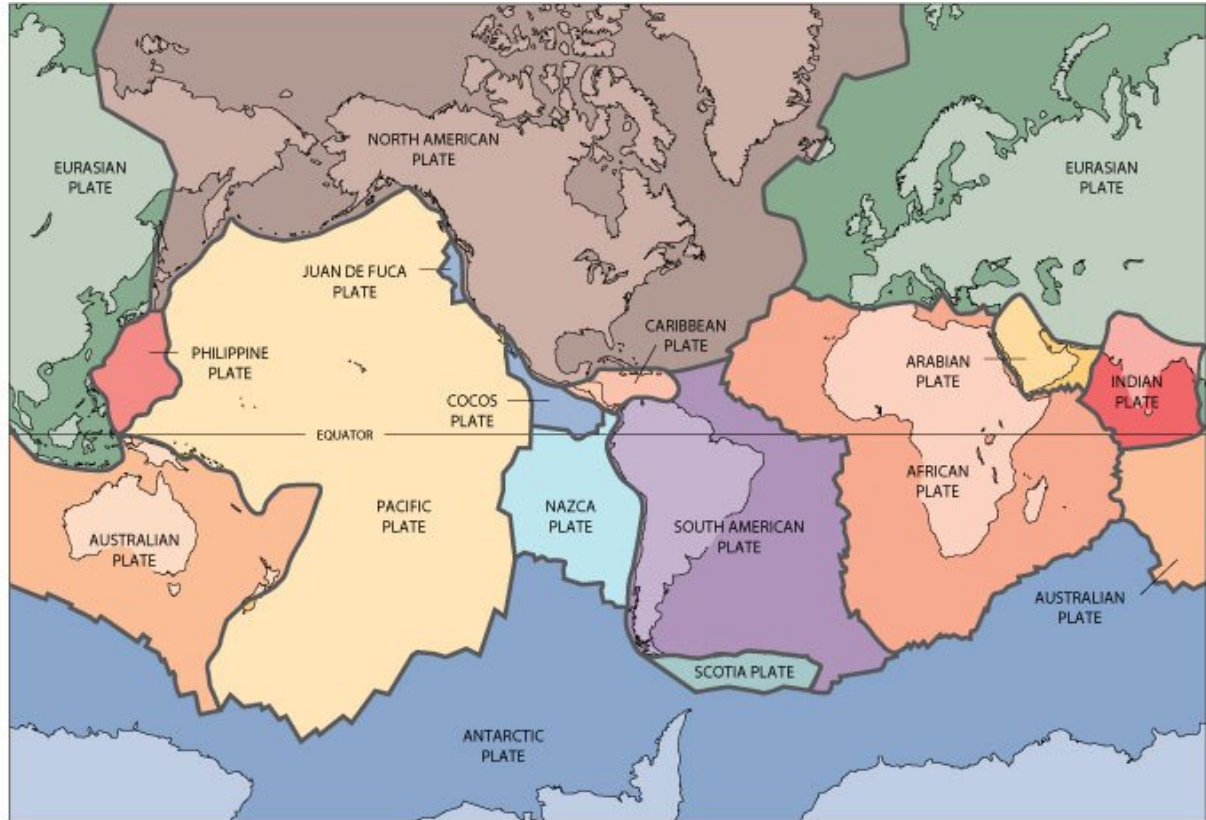
$$\begin{aligned}
X_{t_1} &= X_t + V_t(t - t_1) \\
Y_{t_1} &= Y_t + V_t(t - t_1) \\
Z_{t_1} &= Z_t + V_t(t - t_1) \\
&\dots \\
&\dots \\
&\dots \\
X_{t_n} &= X_t + V_t(t - t_n) \\
Y_{t_n} &= Y_t + V_t(t - t_n) \\
Z_{t_n} &= Z_t + V_t(t - t_n)
\end{aligned} \tag{123}$$

em que cada  $\vec{X}_{t_n}$  corresponde a solução semanal integrada (rede local + rede regional) na época  $t$ . Logo, considerando-se  $K$  épocas e  $n$  estações, tem-se a seguinte representação matricial:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{X_1^1} \\ \vec{V}_{X_1^2} \\ \vdots \\ \vec{V}_{X_1^K} \\ \vdots \\ \vec{V}_{X_n^1} \\ \vec{V}_{X_n^2} \\ \dots \\ \vec{V}_{X_n^K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \Delta t^1 I & \dots & 0 & 0 \\ I & \Delta t^2 I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 & 0 \\ I & \Delta t^K I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & \Delta t^1 I \\ 0 & 0 & \dots & I & \Delta t^2 I \\ 0 & 0 & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & \Delta t^K I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X}_1^0(t_0) \\ \vec{V}_{X_1}^0(t_0) \\ \vdots \\ \vec{X}_n^0(t_0) \\ \vec{V}_{X_n}^0(t_0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \vec{X}_1(t_1) - \vec{X}_1^0(t_0) - \vec{V}_{X_1}^0 \Delta t^1 \\ \vec{X}_1(t_2) - \vec{X}_1^0(t_0) - \vec{V}_{X_1}^0 \Delta t^2 \\ \vdots \\ \vec{X}_1(t_K) - \vec{X}_1^0(t_0) - \vec{V}_{X_1}^0 \Delta t^K \\ \vdots \\ \vec{X}_n(t_1) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^1 \\ \vec{X}_n(t_2) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^2 \\ \vdots \\ \vec{X}_n(t_K) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^K \end{bmatrix}. \tag{124}$$

com  $\vec{V}_{X_t} = [V_X(t), V_Y(t), V_Z(t)]^T$ ,  $\vec{X}_t = [X_X(t), X_Y(t), X_Z(t)]^T$ , na época  $(t)$ , e  $\vec{V}_{X_t}^0 = [V_X(t_0), V_Y(t_0), V_Z(t_0)]^T$  e  $\vec{X}_t^0 = [X_X(t_0), X_Y(t_0), X_Z(t_0)]^T$  na época  $(t_0)$ .

O desenvolvimento das equações de observação (Equação 124) baseiam-se na combinação de soluções semanais GPS (intra-técnica), o que conduz à deficiência em orientação solucionada introduzindo-se o conceito de uma rede sem rotação (NNR). Contudo, o desenvolvimento desta pesquisa compreende estações localizadas, em sua maioria na placa litosférica sul americana, como ilustra a Figura 9:



**Figura 9** – Localização Geográfica das Placas Litosféricas.

Fonte: <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>. Acesso: mar/2009.

A aplicação da condição NNR não influenciará nos resultados, uma vez que deve ser aplicada somente quando tem-se um vasto número de estações, que tenham sido observadas por um longo período, e que representem a Terra em sua globalidade. Portanto, aplicou-se, neste trabalho, somente a condição de origem (NNT – *No Net Translation*), por meio dos vértices das estações que estabelecem o *datum* da rede:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta \vec{X}_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n \Delta \vec{V}_i &= 0 \end{aligned} \tag{125}$$

onde  $\Delta \vec{X}_i$  e  $\Delta \vec{V}_i$  correspondem aos vetores das correções aos parâmetros aproximados e  $n$  ao número de estações que estabelecem o *datum*. A condição NNT, assegura que o baricentro de uma rede que apresente evolução temporal seja constante, o que implica em uma rede livre de translação, mesmo após o ajustamento da rede. Matricialmente essa condição é representada por:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (126)$$

onde a matriz  $C$  apresenta dimensões  $3 \times 3$ , para cada estação envolvida nessa condição.

Verifica-se, nesta etapa, que a escolha das estações deve estar atrelada ao seu comportamento geofísico, localização geográfica e período de observação. A condição NNT (Equação 126) é introduzida somente na solução final, para que desta forma a solução não seja super-injuncionada, nas colunas correspondentes as coordenadas das estações que fazem parte da condição NNT.

Desta forma, ao aplicar o conceito de NNT (Equação 126) a Equação (124) passará a ser representada por:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{X_1^1} \\ \vec{V}_{X_1^2} \\ \vdots \\ \vec{V}_{X_1^K} \\ \vdots \\ \vec{V}_{X_n^1} \\ \vec{V}_{X_n^2} \\ \dots \\ \vec{V}_{X_n^K} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \Delta t^1 I & \dots & 0 & 0 \\ I & \Delta t^2 I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 & 0 \\ I & \Delta t^K I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & \Delta t^1 I \\ 0 & 0 & \dots & I & \Delta t^2 I \\ 0 & 0 & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & \Delta t^K I \\ C_{NNT} & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X}_1^0(t_0) \\ \vec{V}_{X_1}^0(t_0) \\ \vdots \\ \vec{X}_n^0(t_0) \\ \vec{V}_{X_n}^0(t_0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \vec{X}_1(t_1) - \vec{X}_1^0(t_0) - \vec{V}_{X_1}^0 \Delta t^1 \\ \vec{X}_1(t_2) - \vec{X}_1^0(t_0) - \vec{V}_{X_1}^0 \Delta t^2 \\ \vdots \\ \vec{X}_1(t_K) - \vec{X}_1^0(t_0) - \vec{V}_{X_1}^0 \Delta t^K \\ \vdots \\ \vec{X}_n(t_1) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^1 \\ \vec{X}_n(t_2) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^2 \\ \vdots \\ \vec{X}_n(t_K) - \vec{X}_n^0(t_0) - \vec{V}_{X_n}^0 \Delta t^K \\ 0 \end{bmatrix} \quad (127)$$

e, desta forma, o sistema de equações normais para cada solução individual, será dado por (MONICO, 2006):

$$N = A^T N_s A + C^T C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k N_s^i + C^T C & \sum_{i=1}^k N_s^i \Delta t_s^i \\ \sum_{i=1}^k N_s^i \Delta t_s^i & \sum_{i=1}^k N_s^i (\Delta t_s^i)^2 \end{bmatrix}, \quad (128)$$

onde a matriz peso é igual a equação normal de cada solução semanal, ou seja,  $Peso = N_{sem}$ , em que  $K$  representa o número de épocas. Nesta etapa, cada solução individual é conservada livre de injunções, para que possa ser utilizada na obtenção da solução final. Além disso, no

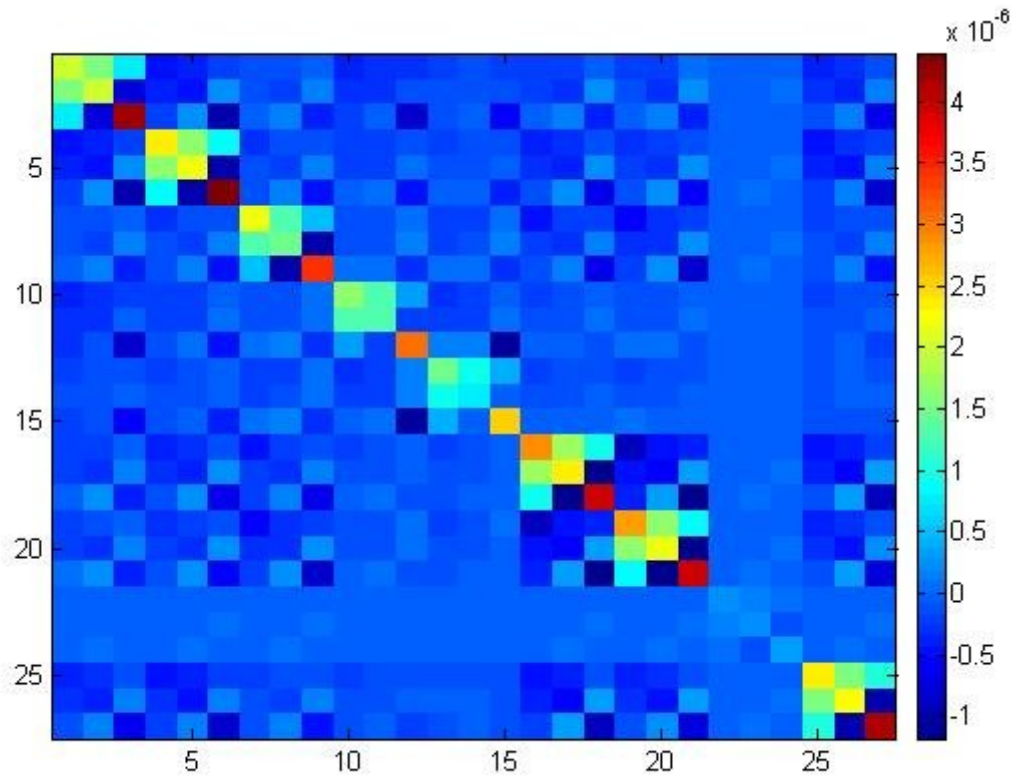
processo de combinação de soluções, os valores aproximados de todos os parâmetros envolvidos devem ser os mesmos.

Portanto, o sistema de equações normais para o sistema de Equações (127) será dado por:

$$\begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^K N_{X_1}^i + C^T C & \sum_{i=1}^k N_{\dot{X}_1}^i \Delta^i & \dots & N_{X_1 X_n}^{i=1, \dots, K} & N_{X_1 \dot{X}_n}^{i=1, \dots, K} \Delta^i \\
 \sum_{i=1}^K N_{\dot{X}_1}^i \Delta^i & \sum_{i=1}^k N_{X_1}^i (\Delta^i)^2 & \dots & N_{\dot{X}_1 X_n}^{i=1, \dots, K} \Delta^i & N_{\dot{X}_1 \dot{X}_n}^{i=1, \dots, K} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 N_{X_n X_1}^{i=1, \dots, K} & N_{X_n \dot{X}_1}^{i=1, \dots, K} \Delta^i & \dots & \sum_{i=1}^K N_{X_n}^i & \sum_{i=1}^k N_{X_n}^i \Delta^i \\
 N_{\dot{X}_n X_1}^{i=1, \dots, K} \Delta^i & N_{\dot{X}_n \dot{X}_1}^{i=1, \dots, K} & \dots & \sum_{i=1}^K N_{X_n}^i \Delta^i & \sum_{i=1}^k N_{X_n}^i (\Delta^i)^2
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \bar{X}_1^0(t_0) \\
 \bar{V}_{X_1}^0(t_0) \\
 \vdots \\
 \bar{X}_n^0(t_0) \\
 \bar{V}_{X_n}^0(t_0)
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{i=1}^K N_{X_1}^i (\bar{X}_1(t_1) - \bar{X}_1^0(t_0) - \bar{V}_{X_1}^0 \Delta t^1) \\
 \sum_{i=1}^K N_{X_1}^i \Delta t^i (\bar{X}_1(t_1) - \bar{X}_1^0(t_0) - \bar{V}_{X_1}^0 \Delta t^1) \\
 \vdots \\
 \sum_{i=1}^K N_{X_n}^i (\bar{X}_n(t_1) - \bar{X}_n^0(t_0) - \bar{V}_{X_n}^0 \Delta t^1) \\
 \sum_{i=1}^K N_{X_n}^i \Delta t^i (\bar{X}_n(t_1) - \bar{X}_n^0(t_0) - \bar{V}_{X_n}^0 \Delta t^1)
 \end{bmatrix}
 \quad (129)$$

Verifica-se que a correlação entre essas estações será trazida com base nos arquivos SINEX (Figura 10). Desta forma, as colunas e linhas coincidentes entre as redes não apresentam valores nulos, ou seja, a combinação entre as matrizes que constituem as equações normais se dá com base na correlação existente entre os parâmetros comuns entre ambas as redes:





**Figura 10** – Correlação entre as soluções locais e globais.

Os parâmetros que não são comuns às soluções são preenchidos com zero, ou seja, ocorre a expansão para a matriz normal, de tal forma que cada solução semanal contenha os mesmos parâmetros.

Assim, ao combinar  $n$  soluções semanais (coordenadas) obtém-se os parâmetros  $X_t$  e  $V_t$  de cada estação na época de referência  $t$ :

$$X_a = [X_1, Y_1, Z_1, V_{X_1}, V_{Y_1}, V_{Z_1}, \dots, X_n, Y_n, Z_n, V_{X_n}, V_{Y_n}, V_{Z_n}]^T \quad (130)$$

Os parâmetros ajustados (Equação 130) compreendem a solução final do ajustamento (coordenadas e velocidades) de cada uma das estações envolvidas no processo de integração de redes geodésicas com base nas soluções semanais estimadas a cada época. Portanto, aplicando-se o MMQ, obtém-se tanto os parâmetros estimados (Equação 130) quanto suas respectivas MVCs (Equação 82) que, por conseguinte, permitem avaliar a qualidade do ajustamento da rede.

## 5 METODOLOGIA

Para a estimativa das coordenadas e velocidades das estações que compõem a RBMC e a Rede GNSS SP, foram utilizados recursos computacionais que possibilitaram corrigir os principais efeitos que influenciam o posicionamento por satélites como a ionosfera, a troposfera, as PVC, entre outros. Nesta perspectiva, foram adotados modelos e correções utilizados no processamento da rede GNSS global como: correções absolutas das PCV; correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera; modelos empíricos da troposfera; funções de mapeamento do atraso troposférico. Além disso, nessa Seção é descrita a metodologia utilizada no processo de integração das redes GNSS locais ao SIRGAS, com base no processo de combinação de equações normais.

### 5.1 Dados utilizados

Neste trabalho, foram utilizados, para um período mínimo de 3 anos de dados (2006 a 2008), os arquivos de observação GPS no formato RINEX das estações Brasília (BRAZ), Bom Jesus (BOMJ), Cuiabá (CUIB), Imperatriz (IMPZ), Manaus (NAUS), Presidente Prudente (PPTE) e Viçosa (VICO) da RBMC, disponibilizados pelo IBGE, no seguinte endereço: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/RBMC/dados>, no formato RINEX. A escolha dessas estações deve-se ao fato das mesmas terem participado da densificação da rede ITRS, na realização ITRF2000 e, atualmente, por contribuírem à densificação e manutenção da rede SIRGAS na América do Sul.

Foram utilizadas, ainda, soluções semanais SIRGAS, fracamente injuncionadas (*SIRwww7.SNX*), no formato SINEX (<ftp://ftp.dgfi.badw-muenchen.de/pub/gps/SIR/>), bem como dados das estações Ilha Solteira (ILHA), Ourinhos (OURI), Rosana (ROSA), São José do Rio Preto (SJRP) e Lins (LINS), pertencentes à Rede GNSS SP, disponibilizados na *Home Page* do GEGE <http://gege.prudente.unesp.br>. A lista com a identificação de todas as estações utilizadas e as respectivas redes a que pertencem encontram-se descritas no Anexo B e suas coordenadas aproximadas no Anexo C.

Na etapa de correção desses dados dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera foram utilizadas as efemérides transmitidas do IGS (<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/>) e os mapas do CODE, disponibilizados diariamente no endereço <ftp.unibe.ch/aiub/CODE/yyy>, denominados por CODGddd0.yyI, onde os dígitos *ddd* referem-se ao dia do ano e os dígitos *yy* correspondem ao ano de referência dos respectivos arquivos.

No processamento desses dados no *software* Bernese foram utilizados arquivos de órbita (*Earth Rotation Parameters* (ERP) semanais e efemérides precisas no formato SP3), disponibilizados pelo IGS no endereço <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/>; arquivos de correções ionosféricas e DCB também disponibilizados pelo CODE; modelo de placas litosféricas; correção do efeito inerente à carga dos oceanos (\*.BQL), obtido no endereço <http://www.oso.chalmers.se/~loading>, bem como arquivos referentes às coordenadas a priori (Anexo C) e velocidades de todas as estações envolvidas no processo de integração de redes.

## 5.2 Softwares e aplicativos

Neste trabalho os dados GPS das redes RMBC e GNSS SP, referentes ao período de 2006 a 2008, foram inicialmente depurados por meio do aplicativo TEQC (*Translate, Edit, Quality Check*), *software* desenvolvido pela UNAVCO (*University NAVSTAR Consortium*), disponível no endereço <http://www.unavco.ucar.edu>, que permite manipular arquivos RINEX, verificando a integridade dos mesmos e corrigindo possíveis erros grosseiros antes do processamento dos dados. Posteriormente, estes arquivos foram utilizados como dados de entrada, juntamente com os mapas do CODE, no aplicativo RINEX\_HO desenvolvido por Marques (2008), que permite a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, com base em um modelo geomagnético da Terra. Esta fase compreende a pré-análise dos dados.

Em seguida, estes dados foram processados com o *software* científico Bernese 5.0, desenvolvido pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berna, Suíça, e adquirido pela FCT/UNESP, campus de Presidente Prudente, no ano de 2006. Toda documentação referente a esse *software* encontra-se disponível no endereço: <http://www.bernese.unibe.ch/download.html>.

O Bernese 5.0 representa uma poderosa ferramenta no auxílio ao desenvolvimento de inúmeras pesquisas, em razão de sua alta performance e acurácia no processamento de soluções obtidas por diferentes técnicas espaciais como GPS, SLR e Glonass, por conter rotinas robustas de automação (BPE- *Bernese Processing Engine*) e pela flexibilidade na utilização de diferentes formatos como RINEX e SINEX, entre outros), entre outros aspectos (BERNESE, 2007).

Dentre as características deste *software* destaca-se:

- Observáveis utilizadas no processamento: fase e/ou pseudodistância obtidas com GPS/GLONASS, ou observações obtidas de SLR;
- Os dados podem ser processados utilizando-se as DDs ou as observáveis originais;

- Aplicação de diferentes combinações lineares entre L1 e L2 como: *ionospherefree*, *geometry-free*, *wide-lane* e *Melburne-Wubbena*;
- Técnica de posicionamento empregada: relativo ou absoluto;
- Modelos Empíricos da Troposfera;
- Funções de mapeamento do atraso troposférico;
- Modelos de calibração da variação do centro de fase da antena: relativa e absoluta;
- Diferentes modelos para a resolução da ambiguidade, o que possibilita fixar as ambigüidades para linhas de base longas (2000 km e maiores);
- Adoção das Convenções IERS: aplicação das correções referentes às influências dos efeitos dos movimentos das placas litosféricas, marés terrestres e carga dos oceanos;
- Determinação da órbita dos satélites GNSS e de satélites de baixa órbita como o LEO (*Low Earth Orbit Satellites*) e dos EOP;
- Cálculo das correções do relógio do satélite e do receptor;
- Estimativa das coordenadas e velocidades das estações;
- Estimativa do atraso troposférico;
- Estimativa do centro de massa da Terra;
- Cálculo do *offset* do centro de fase da antena do satélite e do receptor;
- Aplicação ou cálculo das tendências interfrequências para cada receptor (DCB);
- Cálculo dos mapas ionosféricos em escala global (MGI) ou regional;
- Combinação das equações normais de soluções obtidas em diferentes épocas ou campanhas, com o módulo ADDNEQ2.

Desta forma, verifica-se que o *software* Bernese atende a inúmeras aplicações GNSS que requeiram alta acurácia e que, portanto, atende aos objetivos propostos no desenvolvimento desta pesquisa.

### 5.3 Processamento dos dados GPS

Nesta pesquisa, buscou-se adotar as estratégias de processamento recomendadas pela SIRGAS-CON, tanto no que se refere às estratégias de processamento dos dados GPS, como também aos critérios associados à combinação de soluções geradas pelos centros de análise SIRGAS. A estratégia de processamento adotada neste trabalho é descrita na Tabela 5:

**Tabela 5** – Estratégia de Processamento dos dados GPS.

Ângulo de elevação	10°
Taxa de processamento	30 segundos
Órbitas/EOP	IGS final/ EOP semanal
Estratégia para a definição das linhas de base	SHORTEST - leva em consideração a distância entre as estações observadas, ou seja, as linhas de base são criadas a partir da menor distância entre as estações.
Estratégia para a solução da ambiguidade	QIF com GIM do CODE
Modelo da Troposfera	Saastamoinen
Função de mapeamento da Troposfera	Niell
Atraso troposférico	Estimado a cada 2 horas (12 correções diárias para cada estação)
Modelo troposférico a priori	Função de Niell para a componente seca
Modelo das Cargas dos Oceanos	FES2004
Modelo de calibração das PCV	Absoluta
Gradiente horizontal da Troposfera	<i>Tilting</i> (ângulos implícitos descritos em duas componentes norte e este) com espaçamento a cada 24°00'00"
Coordenadas e velocidades	ITRF2000
Solução Diária	<i>Free Network</i> (normais diárias)
Soluções semanais	Arquivos SINEX semanais fracamente injuncionadas e equações normais (NEQ) livres e injuncionadas
Soluções anuais	Free Network (normais anuais)
Solução Final	<i>Coordinate Constrained:</i> BRAZ, BOMJ, CRO1, CUIB, IMPZ, KOUR, LPGS, OHI2, SANT, NAUS, PPTE, RIOG, VICO

Verifica-se, na Tabela 5, que as estações BRAZ, BOMJ, St. Croix VLBA/USA (CRO1), Kourou (KOUR), La Plata (LPGS), O'Higgins/Antarctica (OHI2), Santiago (SANT), Rio Grande/Argentina (RIOG), pertencentes a rede SIRGAS, tiveram suas coordenadas injuncionadas com precisão de 1 milímetro ( $\sigma = \pm 1mm$ ). As demais estações como CUIB, IMPZ, NAUS, PPTE e VICO da RBMC foram injuncionadas de acordo com as precisões de suas coordenadas geodésicas disponibilizadas pelo IBGE em seus respectivos descritivos.

Neste contexto, foi elaborado um *script* para a realização do processamento automático desses dados no *software* Bernese, como descrito na Tabela 6 (BERNESE, 2007):

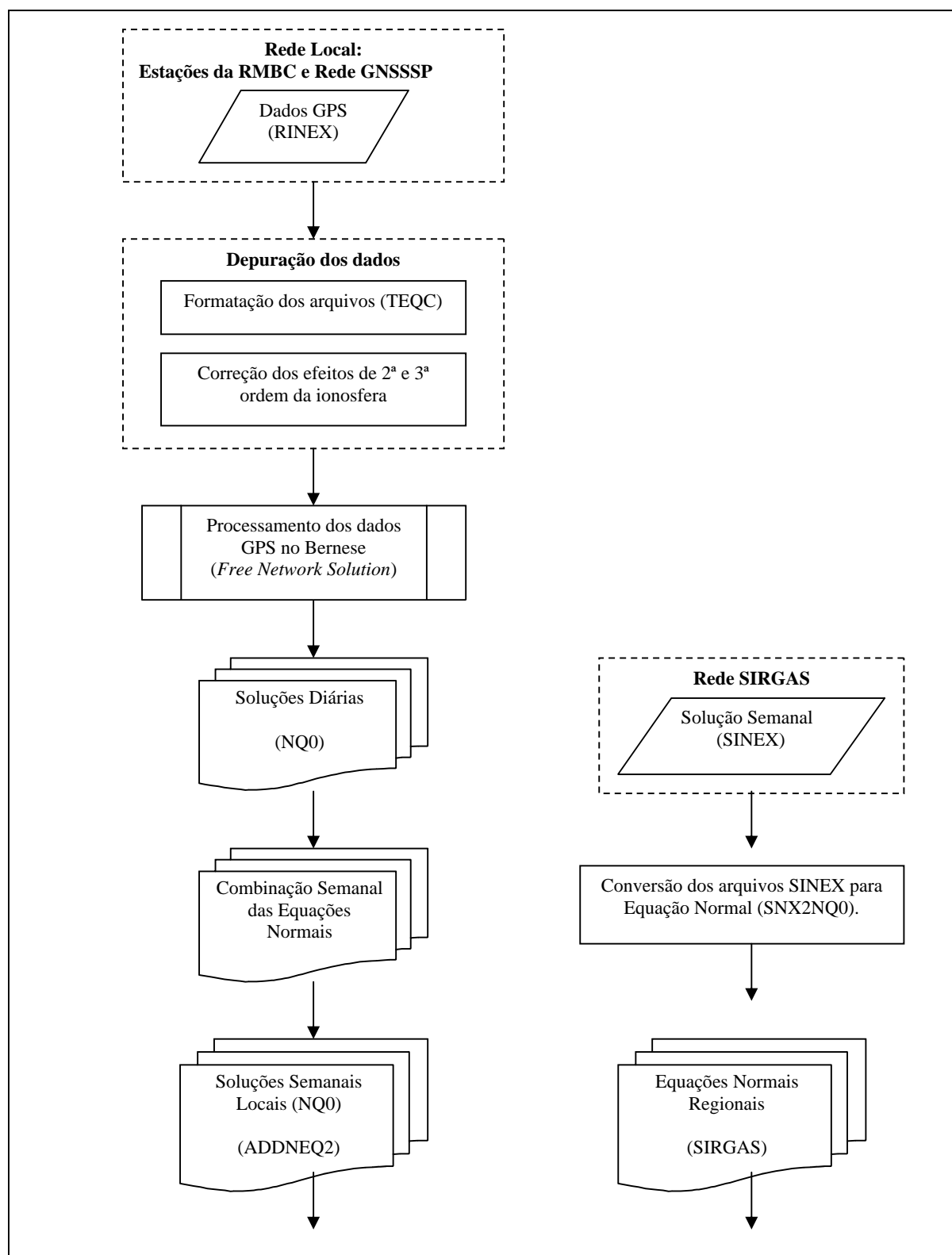
**Tabela 6** – Módulos utilizados no Bernese na obtenção das equações normais diárias.

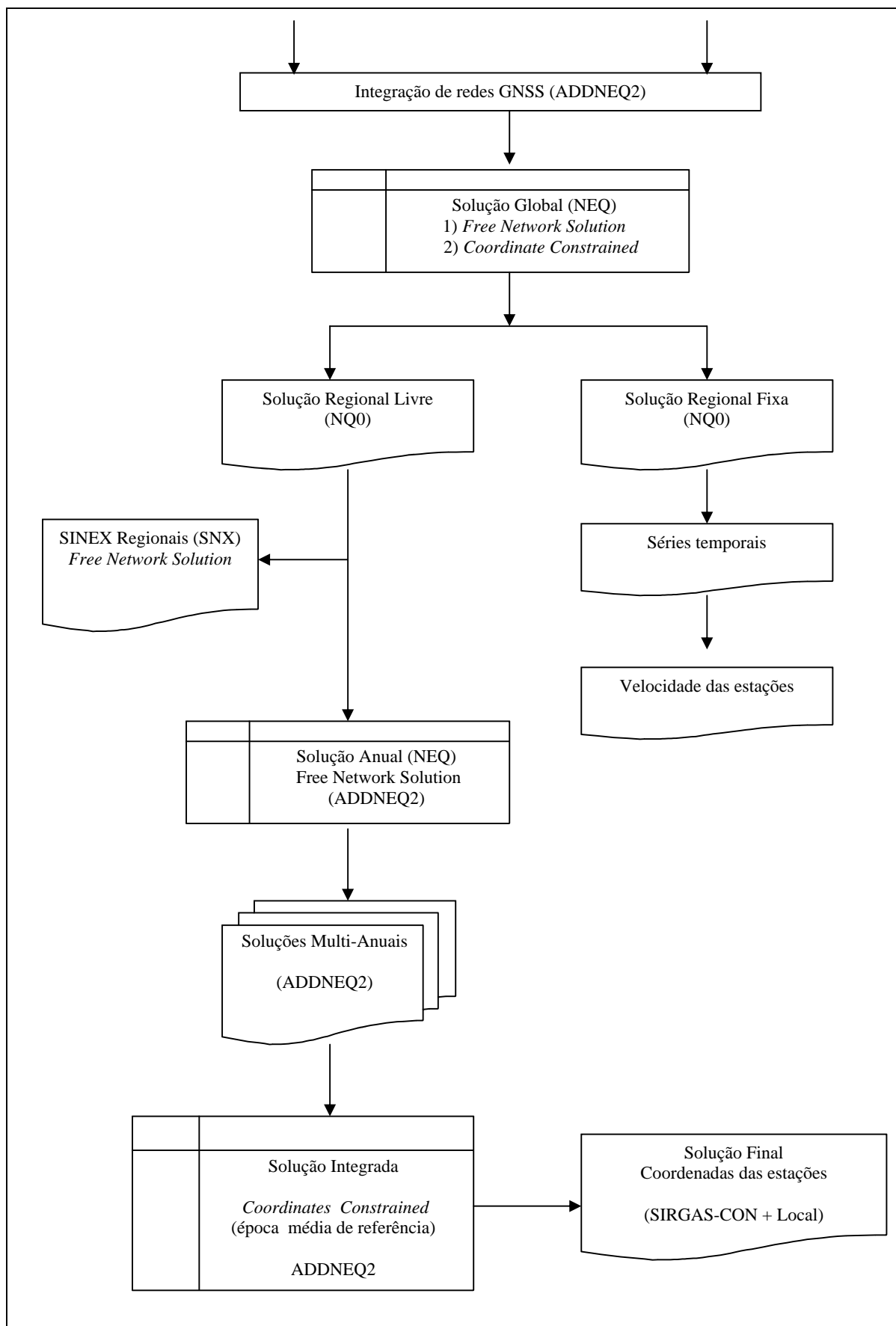
<b>Módulos</b>	<b>Finalidade</b>
COOVEL	Propaga as coordenadas das estações de referência para a época de rastreamento, por meio das velocidades das estações de referência.
POLUPD	Transforma os ERP no formato externo (IERS, IGS) para o formato Bernese.
PRETAB	Converte órbitas precisas GNSS (no formato sp3, por exemplo) em órbitas tabulares.
ORBGEN	Cria órbitas no formato Bernese a partir das órbitas tabulares.
RXOBV3	Converte os arquivos de observação no formato RINEX para o formato Bernese.
CODSPP	Calcula as correções do relógio do receptor, sincronizando-o com o tempo GPS, além de determinar as coordenadas aproximadas das estações.
SNGDIF	Cria as linhas de base entre as estações por meio das SDs das observações de fase.
MAUPRP	Seleciona as perdas de ciclos com base no pré-processamento das SDs de fase. Caso perdas de ciclo sejam encontradas o programa tenta corrigir as observações removendo os <i>outliers</i> ou introduzirá uma nova ambiguidade como parâmetro.
MPRXTR	Extraí a saída do programa MAUPRP e gera um sumário com as linhas de base processadas com seu comprimento e número de perdas de ciclo detectadas, etc.
GPSEST	Gera as coordenadas a priori a partir das DDs de fase e gera um arquivo de resíduos após o ajustamento pelo MMQ.
RESRMS	Detecta erros grosseiros e gera um arquivo com os resíduos e demais estatísticas do processamento.
SATMRK	Identifica os <i>outliers</i> presentes nas observações por meio das informações geradas pelo RESRMS.
GPSEST	Gera uma solução <i>Float</i> .
BASLST	Seleciona individualmente cada linha de base para solucionar as ambigüidades.
GPSEST	Soluciona as ambigüidades utilizando a estratégia QIF <i>Quase (Ionosphere-Free)</i> , recomendada para linhas de bases longas (com comprimentos maiores que 1000/2000 km).
GPSXTR	Extraí as informações geradas pelo GPSEST e gera diferentes sumários (RMS, número de observações e parâmetros, etc).
GPSEST	Introduz as ambigüidades solucionadas e disponibiliza a solução final no formato de Equações Normais que serão utilizadas posteriormente no módulo ADDNEQ2.

Por meio desses módulos (Tabela 6) foram obtidas as soluções diárias (Equações Normais) para as estações BRAZ, BOMJ, CUIB, IMPZ, NAUS, PPTE, VICO, ILHA, OURI, ROSA, SJRP e LINS, com base em um ajustamento livre (*Free Network Solution*) sem a definição do *datum*, ou seja, nenhuma estação teve suas coordenadas fixadas. As equações normais (NQ0) compreendem as soluções da rede local (estações RMBC + GNSS SP), que serão utilizadas no processo de combinação de soluções normais com o módulo ADDNEQ2.

#### 5.4 Integração das redes RBMC e GNSS SP à rede SIRGAS-CON

Na Figura 11, apresenta-se de forma esquemática a metodologia proposta nesta pesquisa para a densificação da rede SIRGAS-CON na América Latina, com base na integração desta rede regional com as redes GNSS locais RBMC e GNSS SP:





**Figura 11 - Metodologia de integração de redes GNSS.**



Nessa metodologia, os dados GPS das redes locais são inicialmente depurados, fase esta que compreende a edição e formatação dos arquivos RINEX e a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem a ionosfera, respectivamente, com os aplicativos TEQC e RINEX\_HO. Posteriormente, esses dados são processados diariamente com o *software* Bernese 5.0, com base no ajustamento livre, ou seja sem a definição do datum, isso implica que nenhuma das coordenadas das estações envolvidas no processamento foram injuncionadas, resultando em soluções diárias (equações normais) livres de injunção. Portanto, a única informação externa que define implicitamente a origem do *datum* são as órbitas GPS introduzidas no processamento, o que implica que a geometria da rede não se altere, já que depende das observações GPS da rede.

Essas soluções diárias são armazenadas e combinadas semanalmente com o módulo ADDNEQ2 do Bernese, que permite a combinação de soluções com base nas equações normais, resultando em soluções semanais locais livres de injunção (NQ0). Esse procedimento implica em um ganho computacional considerável, no que se refere ao tempo de processamento demandado na combinação das matrizes locais (sub-matrizes) obtidas para múltiplas sessões com o módulo ADDNEQ2.

As soluções semanais da rede local posteriormente podem ser integradas à uma rede de natureza distinta, como a rede regional SIRGAS, sem a necessidade de se processar conjuntamente todas as estações que compõem ambas as redes. Para tanto, basta haver estações comuns entre as mesmas e utilizar soluções disponibilizadas pela rede regional na mesma época de referência e em formatos que possibilitem a aplicação desta metodologia, como neste estudo de caso os arquivos SINEX, que fornecem parâmetros necessários à reconstrução das equações normais das soluções semanais. Neste trabalho, foram utilizadas as soluções semanais SIRGAS fracamente injuncionadas (*loosely constrained*), cujas equações normais foram reconstruídas utilizando-se o módulo SNX2NQ0 do Bernese.

A integração entre essas redes (regional + local) foi feita com base na combinação das equações normais, utilizando o módulo ADDNEQ2 de duas formas: livre (*free network*) e injuncionada (*coordinate constrained*). O primeiro caso, aplica-se às soluções multi-anuais, em que se obtém coordenadas e velocidades das estações para um período maior e igual a três anos de dados. Nesta fase, as equações integradas são armazenadas e novos SINEX são gerados, com base na nova lista de estações.

As soluções injuncionadas destinam-se a fins práticos como atividades que envolvam posicionamento, SIG (Sistema de Informações Geográficas), e atividades de pesquisa que utilizem coordenadas. Nessas soluções, as coordenadas das estações que definem o *datum* são

injunctionadas e estimadas juntamente com as coordenadas das estações envolvidas no processamento. Ressalta-se que para se realizar a combinação de soluções a partir das equações normais, ambas as soluções devem estar livres de injunções, caso contrário conduzirá a obtenção de uma solução final super-injunctionada.

## 5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os experimentos e os resultados obtidos na pesquisa. O primeiro conjunto de experimentos refere-se à correção e análise do impacto dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, para o período de três anos de dados (2006 a 2008), tanto nas observáveis GPS quanto na estimativa das coordenadas das estações.

Em seguida, são apresentadas as soluções obtidas (coordenadas e velocidades) com base no processo de integração de redes geodésicas, comparando-as com a solução SIRGAS (SIR09P01), época de referência 2005,0, com base em estações comuns à ambas as redes.

### 5.1 Correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera

A aplicação da correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera foi realizada com base na fundamentação teórica apresentada na Seção 4.1.1, utilizando-se para tanto o *software* RINEX\_HO. Este *software* aplica as correções nas observáveis GPS, com base no TEC calculado a partir da pseudodistância (Equação 69), o qual é interpolado a partir dos GIMs, disponibilizados via Internet (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>), e nas informações associadas ao campo geomagnético da Terra, possibilitando o cálculo dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera.

Para tanto, este *software* utiliza como arquivos de entrada as efemérides transmitidas (*broadcast*), disponíveis pelo CDDIS - *Crustal Dynamics Data Information System* (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/>), os GIMs, disponibilizados pelo CODE e os arquivos de observação no formato RINEX. Ressalta-se que a coordenada a priori presente no cabeçalho do RINEX é utilizada pelo *software*, o que torna necessário que o usuário insira esta informação manualmente ou por meio de aplicativos como o TEQC.

Com base nesta problemática, elaborou-se um *script* em BAT\*, que possibilita executar, de forma sequencial o aplicativo TEQC e o *software* RINEX\_HO. Neste *script*, os arquivos RINEX das 12 estações processadas (BRAZ, BOMJ, CUIB, ILHA, IMPZ, NAUS, OURI, PPTE, ROSA, SJRP, VICO, LINS) foram, inicialmente, formatados (nome da estação,

---

\* Sequência de comandos em DOS que possibilita executar de forma sequencial tarefas de interesse.

taxa de observação, tipo de observável) e tiveram suas coordenadas a priori editadas, com base em suas coordenadas homologadas pelo IBGE, e disponibilizadas em seus respectivos descritivos (Anexo C).

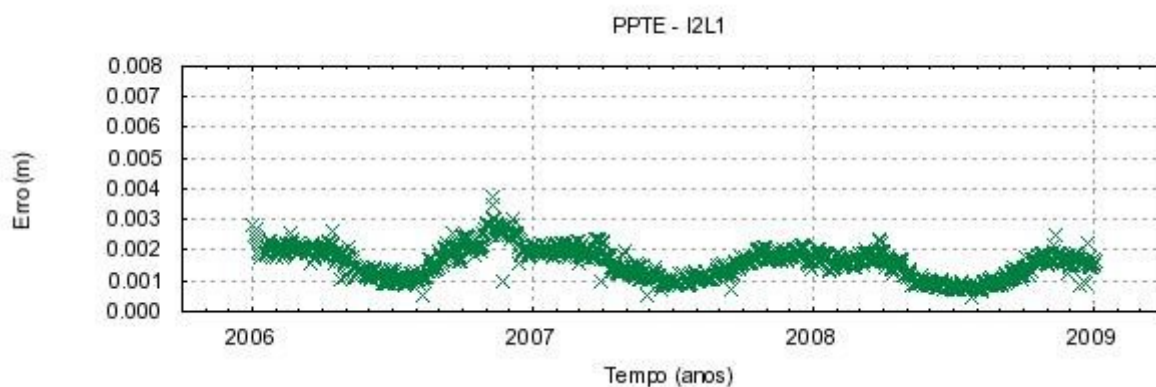
Posteriormente, este *script* executa o *software* RINEX\_HO obtendo, para cada dia do ano e estação a magnitude dessas correções. A Tabela 7, apresenta a variação média anual calculada para o período de três anos de dados (2006 a 2008), dos efeitos de 2ª e 3ª ordem, em metros, para o código C/A ou P1, para o código P2 e para a fase ( $\phi$ ), nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  indicadas, respectivamente, pelos sub-índices 1 e 2:

**Tabela 7** - Variação média anual dos efeitos de 2ª e 3ª ordem para a fase e para o código nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$ .

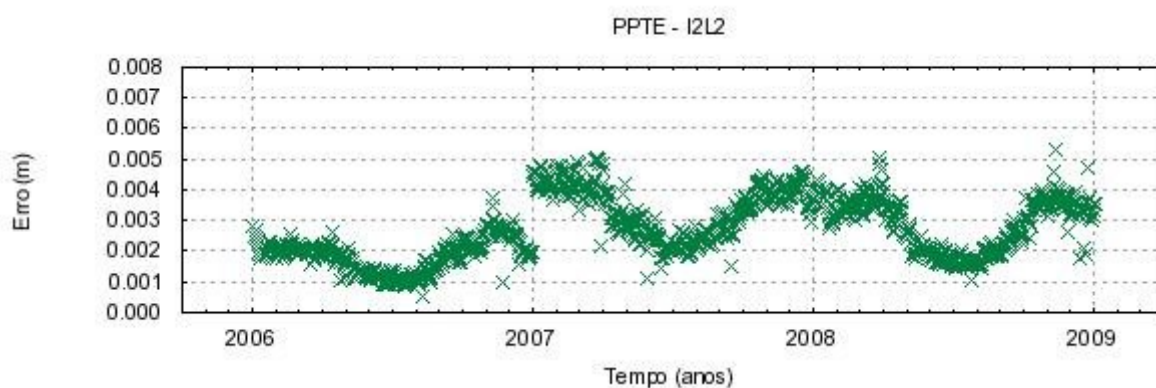
Estações	2ª ordem				3ª ordem			
	C/A (m)	P2(m)	$\phi_1$ (m)	$\phi_2$ (m)	C/A (m)	P2(m)	$\phi_1$ (m)	$\phi_2$ (m)
<b>BRAZ</b>	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>BOMJ</b>	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>CUIB</b>	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,001	-0,000	-0,000
<b>ILHA</b>	0,004	0,008	-0,002	-0,004	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>IMPZ</b>	0,004	0,009	-0,002	-0,005	0,000	0,001	-0,000	-0,000
<b>LINS</b>	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>NAUS</b>	0,006	0,008	-0,003	-0,004	0,000	0,001	-0,000	-0,000
<b>OURI</b>	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>PPTE</b>	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>ROSA</b>	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>SJRP</b>	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000
<b>VICO</b>	0,004	0,006	-0,002	-0,003	0,000	0,000	-0,000	-0,000

Verifica-se, na Tabela 7, que a magnitude obtida para os efeitos de 2ª ordem é condizente com os valores mencionados na literatura. Em contrapartida, para os efeitos de 3ª ordem, verifica-se que estes efeitos não foram totalmente corrigidos para a maioria das estações processadas, atingindo níveis sub-milimétricos. Desta forma, para uma melhor compreensão do comportamento dos efeitos de 2ª e 3ª ordem ao longo do ano, foram geradas séries temporais da média diária destes efeitos para o período de 2006 a 2008.

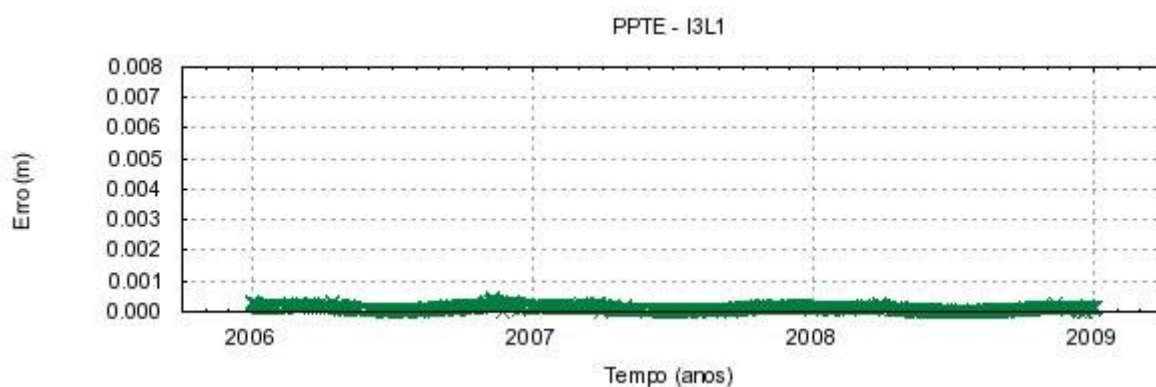
Nas Figuras 12 a 15, apresenta-se a variação média diária dos efeitos de 2ª e 3ª ordem, respectivamente, nas portadoras  $L_1$  e  $L_2$  para a estação PPTE:



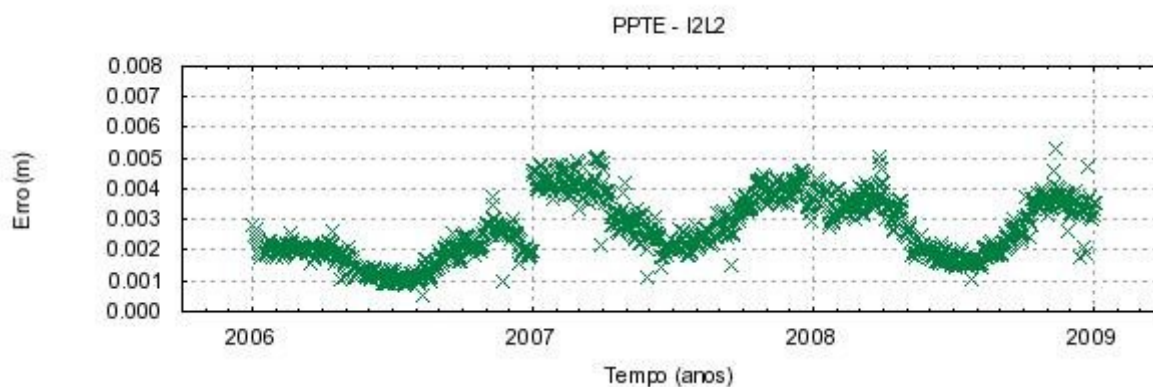
**Figura 12** - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L1 para a estação PPTE.



**Figura 13** - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L2 para a estação PPTE.

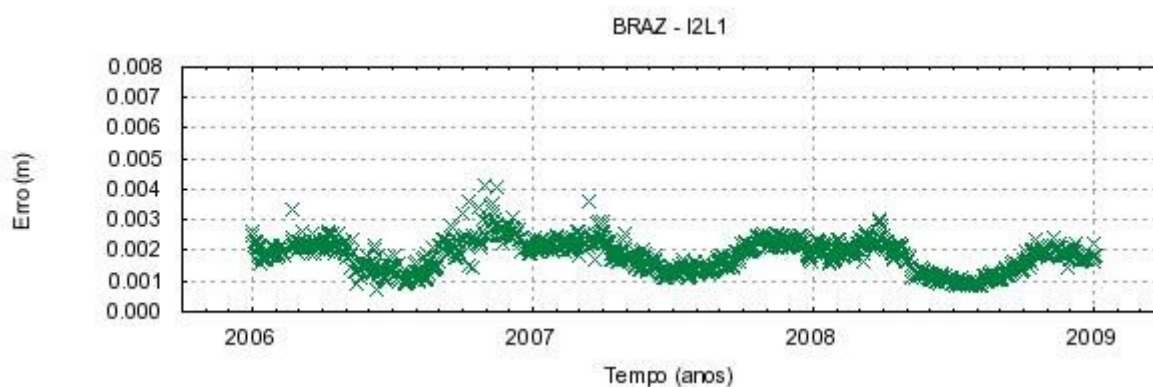


**Figura 14** - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L1 para a estação PPTE.

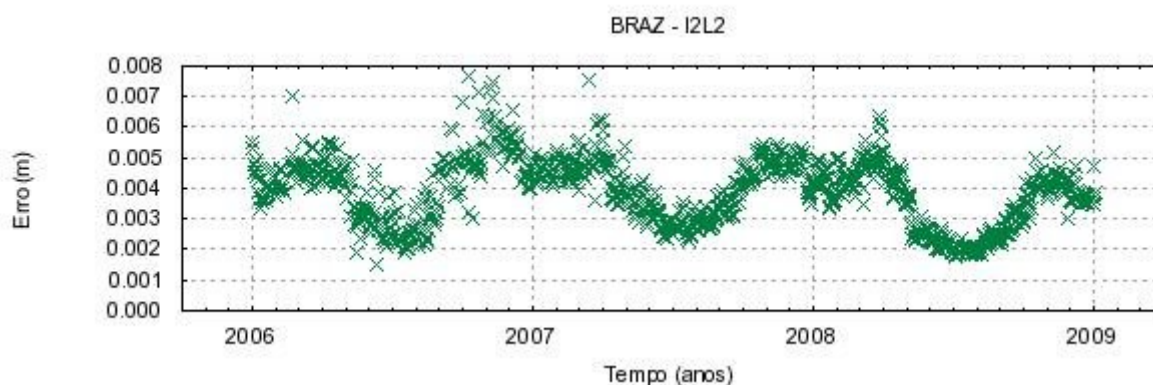


**Figura 15** - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L2 para a estação PPTÉ.

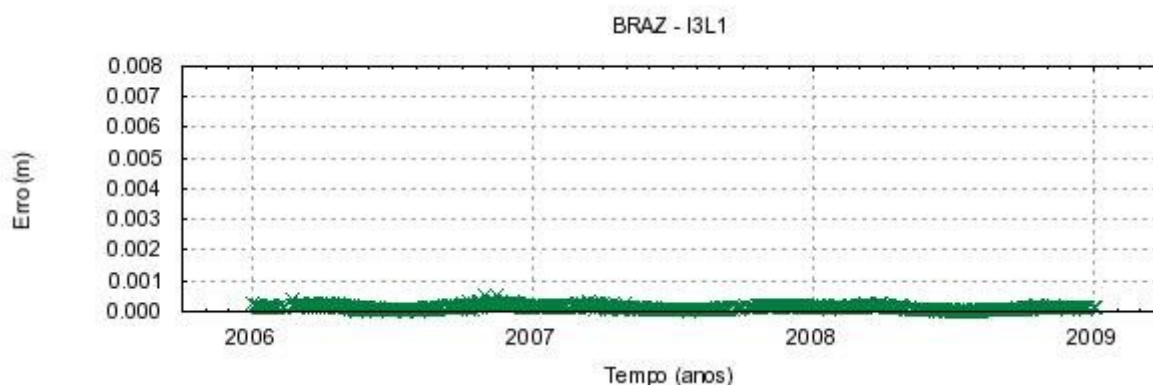
Nas Figuras 16 a 19, tem-se a variação média diária dos efeitos de 2ª e 3ª ordem, respectivamente, nas portadoras L1 e L2 para a estação BRAZ:



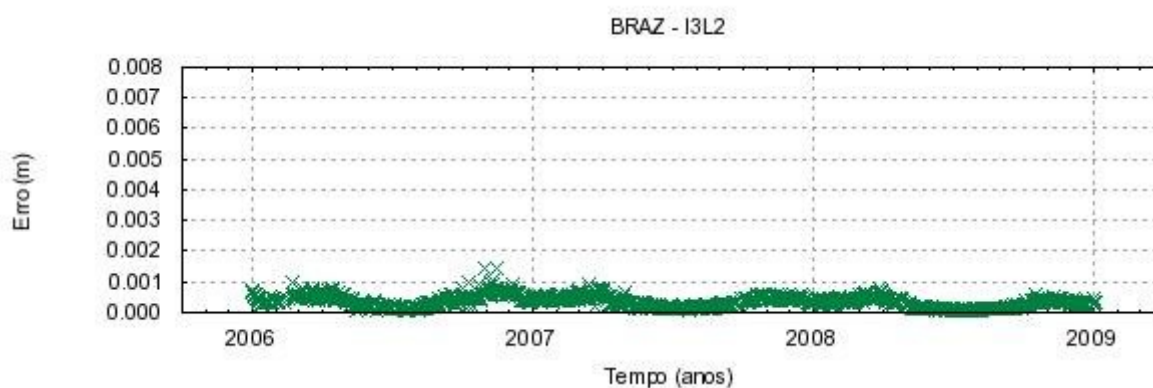
**Figura 16** - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L1 para a estação BRAZ.



**Figura 17** - Variação média diária do efeito de 2ª ordem na observável L2 para a estação BRAZ.



**Figura 18** - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L1 para a estação BRAZ.

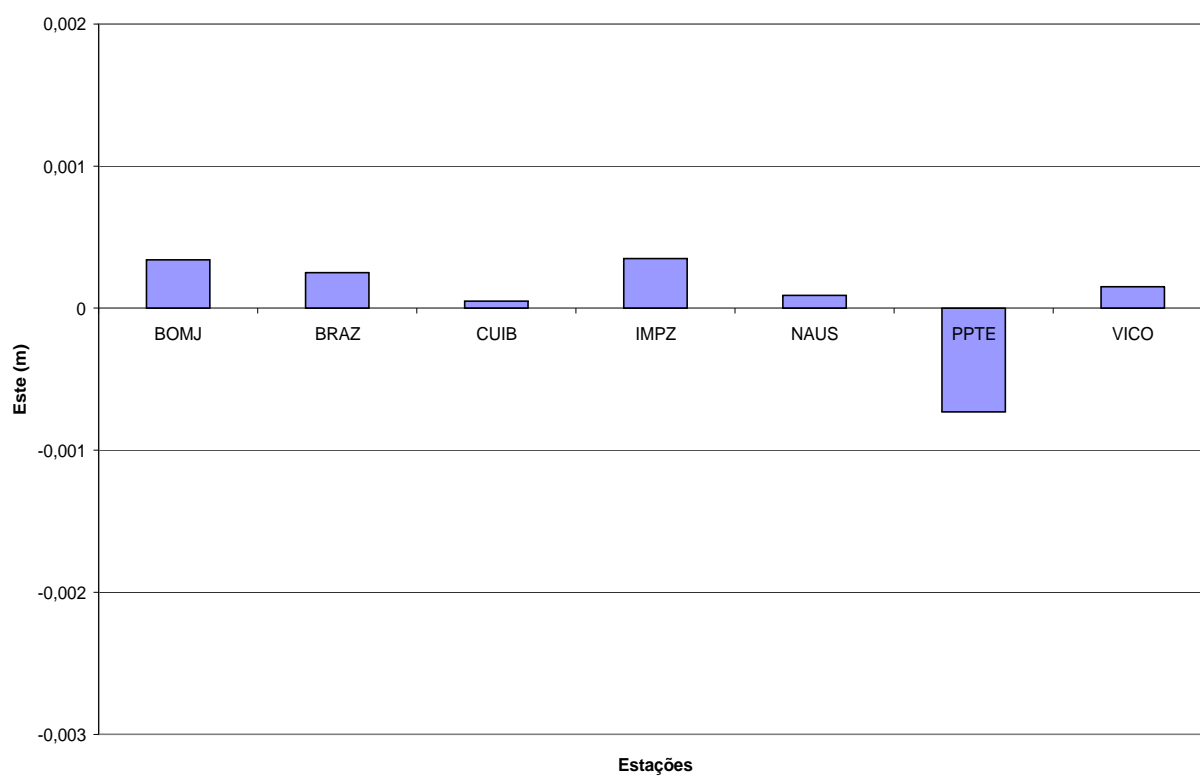


**Figura 19** - Variação média diária do efeito de 3ª ordem na observável L2 para a estação BRAZ.

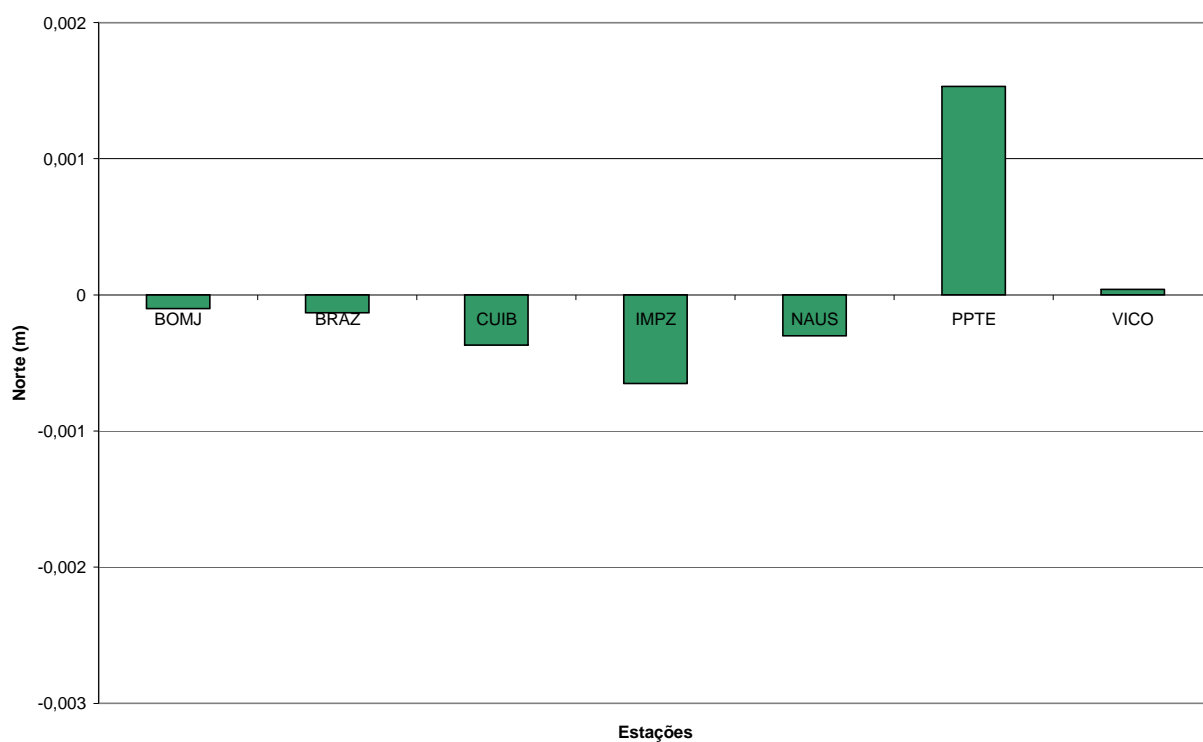
Ressalta-se que o período analisado neste experimento (2006 a 2008) refere-se a um período de mínima atividade solar, o que implica que os efeitos de 3ª ordem possam atingir valores de 0,001 metros, como evidenciado na Tabela 7 e nas Figuras 14 e 15 para a estação PPTE e nas Figuras 18 e 19 para a estação BRAZ. Contudo, a modelagem deste efeito se faz necessária no contexto da temática proposta. As séries temporais dos efeitos de 2ª e 3ª ordem geradas para as demais estações processadas encontram-se no Apêndice A.

Posteriormente, foram feitas análises dos efeitos de 2ª e 3ª ordem no posicionamento relativo, comparando-se as séries temporais geradas com base nas soluções obtidas com o *software* Bernese para o ano de 2006, utilizando-se efemérides precisas IGS e a estratégia de processamento *shortest*. Neste experimento, foram analisadas as discrepâncias entre os resultados obtidos sem as correções dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera e utilizando os arquivos RINEX corrigidos pelo aplicativo RINEX\_HO. As coordenadas das estações BOMJ, BRAZ, CUIB, IMPZ, NAUS, PPTE, VICO foram estimadas com injunções relativas (*constrained*) na etapa de combinação das equações normais pelo módulo ADDNEQ2.

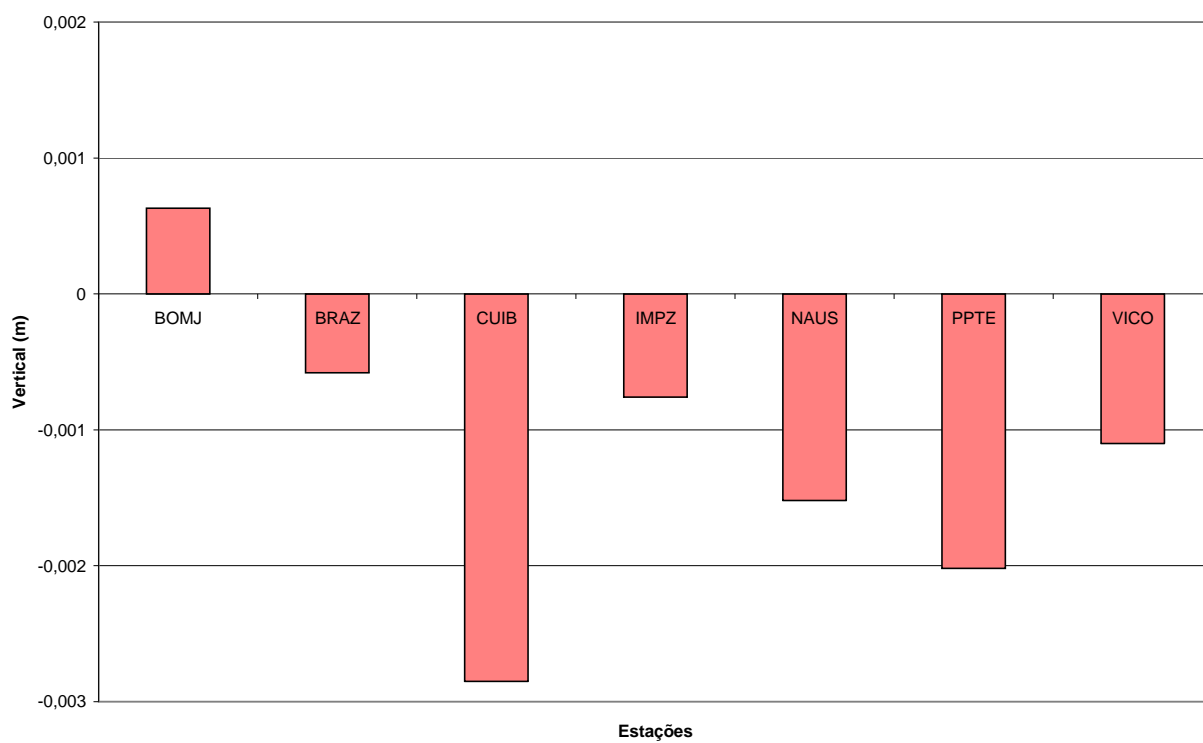
As Figuras 20 a 22, apresentam a discrepância para as componentes  $e$ ,  $n$  e  $u$ , em metros, das estações BOMJ, BRAZ, CUIB, IMPZ, NAUS, PPTE, VICO, com base nas discrepâncias das médias diárias entre as séries temporais geradas para o ano de 2006, com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera:



**Figura 20** – Discrepância entre as soluções geradas com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a componente Este.



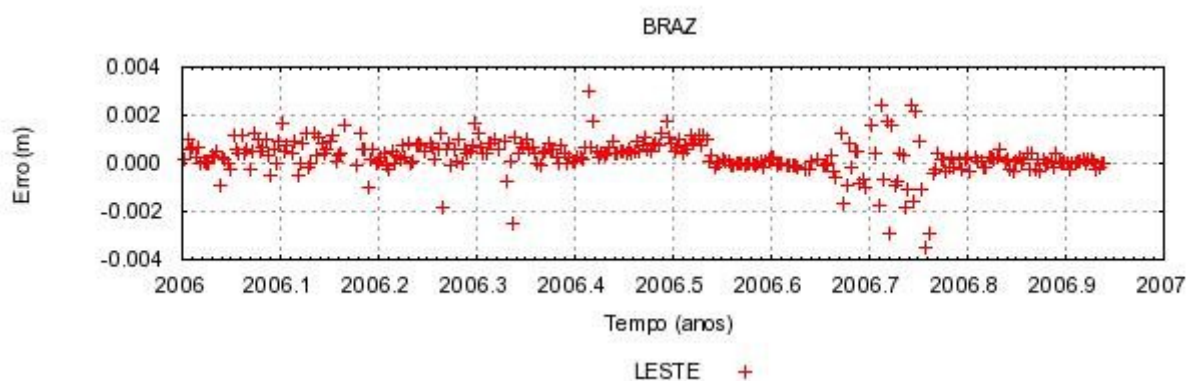
**Figura 21** – Discrepância entre as soluções geradas com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a componente Norte.



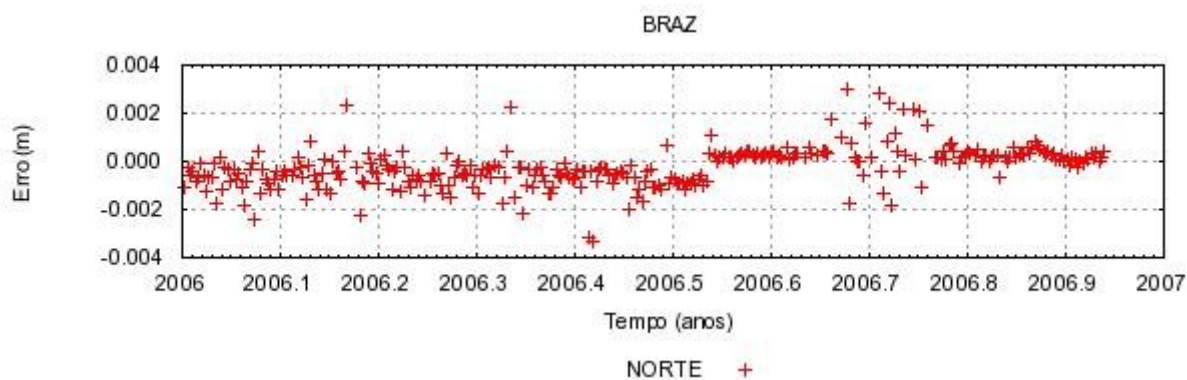
**Figura 22** – Discrepância entre as soluções geradas com e sem a correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a componente Vertical.



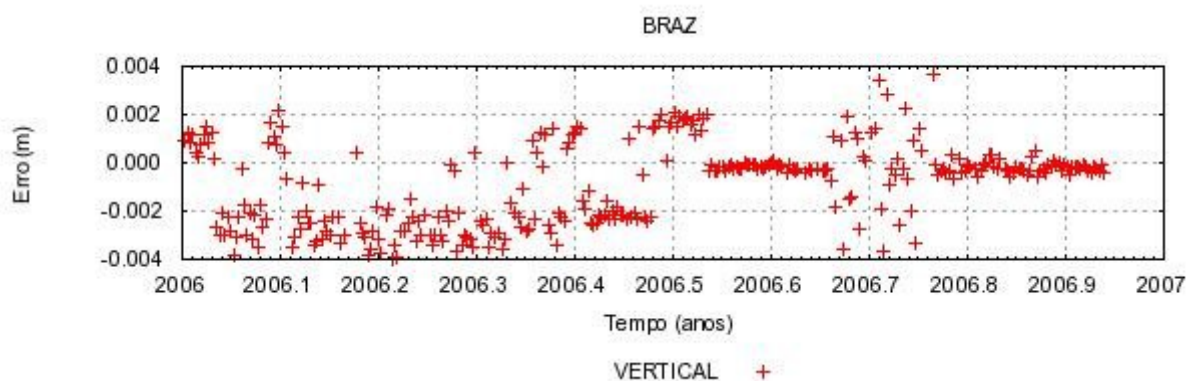
Verifica-se, por meio das Figuras 20 a 22, que a discrepância encontrada entre essas soluções é milimétrica, para o período analisado, atingindo valores maiores para a componente altimétrica em torno de 3 mm, resultados estes condizentes com a literatura (MARQUES, 2008). Como forma de exemplificação, foram geradas as séries temporais das discrepâncias entre as coordenadas estimadas com e sem a correção destes efeitos, para as estações BRAZ e PPTE, como ilustram as Figuras 23 a 28:



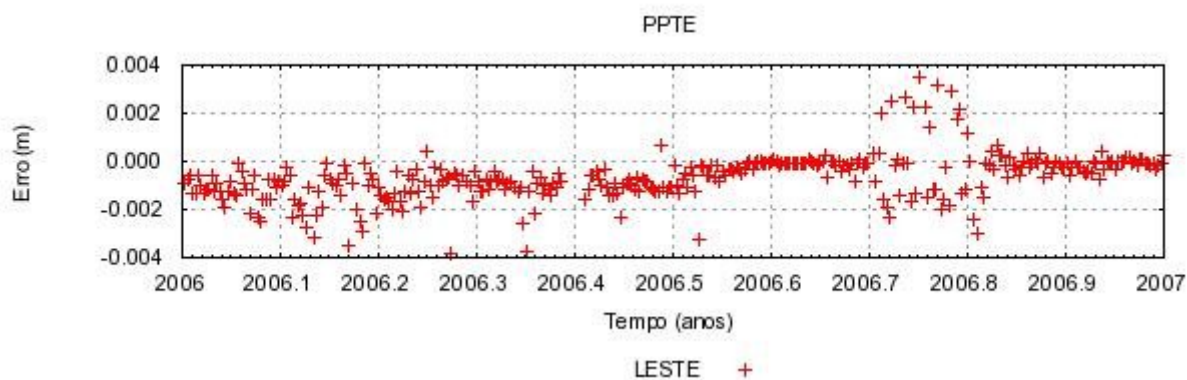
**Figura 23** – Discrepância na componente Leste entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação BRAZ.



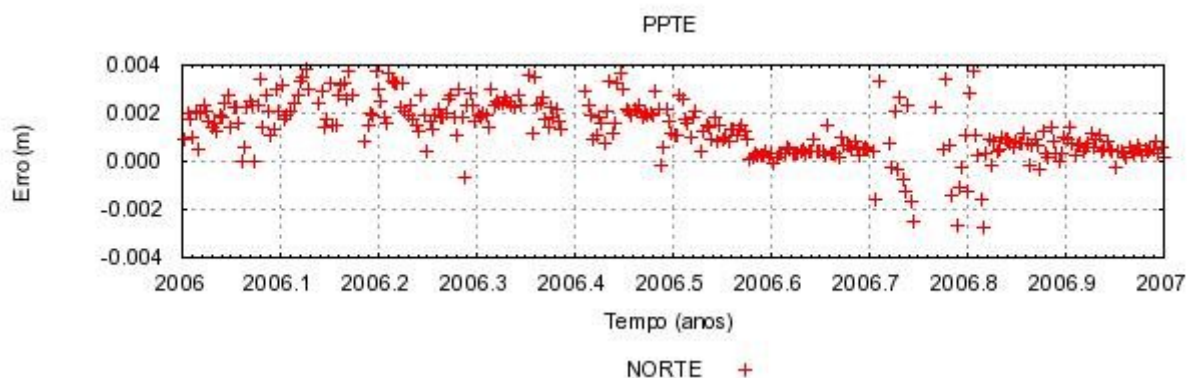
**Figura 24** – Discrepância na componente Norte entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação BRAZ.



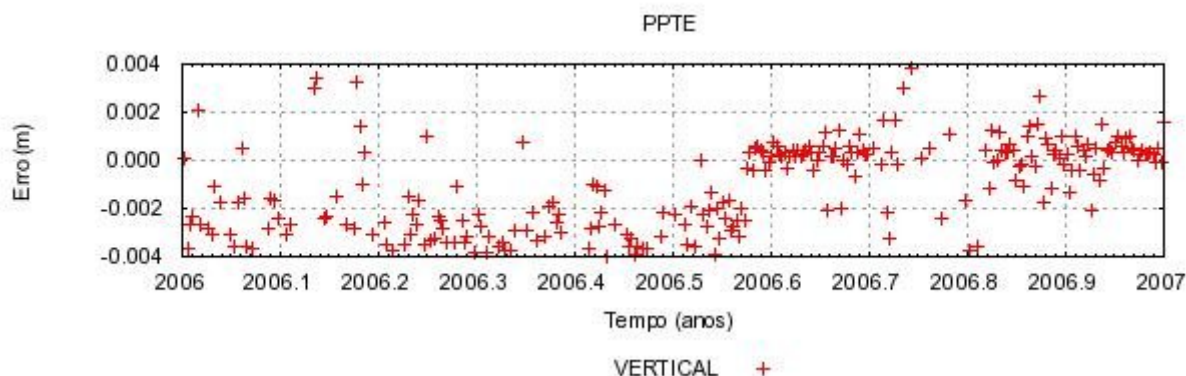
**Figura 25** – Discrepância na componente Vertical entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação BRAZ.



**Figura 26** – Discrepância na componente Leste entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação PPTE.



**Figura 27** – Discrepância na componente Norte entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera para a estação PPTE.



**Figura 28** – Discrepância na componente Vertical entre as soluções obtidas com e sem correção dos efeitos de 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem da ionosfera para a estação PPTE.

Verifica-se, com base nas séries temporais representadas nas Figuras 23 a 28, que a discrepância varia de 1 a 4 mm, sendo maior para a componente vertical. Esses valores estão condizentes com os valores encontrados nos experimentos desenvolvidos por Fritsche et al. (2005), em que se adota a mesma estratégia de processamento com o *software* Bernese, ou seja, o processamento da rede inicialmente é livre. Posteriormente, são injuncionadas somente as estações que estabelecem o *frame* a cada época, mais especificamente, em cada solução semanal, resultando em uma solução semanal fixa, com base nas quais geram-se as séries temporais das coordenadas das estações.

## 5.2 Obtenção e análise das soluções integradas

Nesta Seção serão apresentados os resultados obtidos com o *software* Bernese, com base na metodologia de integração de redes apresentada na Seção 5.4, resultando na estimativa das coordenadas de 193 estações, obtidas a partir do processamento de três anos de dados 2006 a 2008, que compreende as semanas GPS 1356 a 1512. Dessas estações apenas 92 tiveram suas velocidades estimadas com base em critérios como: período de atividade maior e igual a três anos; quantidade de dados maior e igual a três anos e situação no contexto da rede SIRGAS (ativa, desativada, descomissionada). Nesta etapa, as coordenadas das estações BOMJ, BRAZ, CRO1, CUIB, IMPZ, KOUR, LPGS, NAUS, OHI2, PPTE, SANT, VICO foram estimadas com injunções relativas (*constrained*) na etapa de combinação das equações normais pelo módulo ADDNEQ2. As estações da RBMC foram injuncionadas de acordo com a precisão de suas respectivas coordenadas curvilíneas encontradas nos descritivos disponibilizados pelo IBGE, enquanto que as estações SIRGAS foram injuncionadas com a precisão de 1mm.

Em virtude do número de observações super-abundantes às precisões obtidas na estimativa dos parâmetros ajustados (coordenadas e velocidades) foram muito otimistas, ou seja, de ordem sub-milimétrica e desta forma, não encontram-se descritas nos Apêndices B e C, por retratarem somente o grau de consistência (dispersão) entre os valores estimados e não a acurácia desses dados, em que se considera os erros aleatórios e sistemáticos envolvidos no ajustamento de forma avaliar o grau de concordância do valor estimado com o seu valor verdadeiro em um conjunto de dados.

No Apêndice B são apresentadas as coordenadas das 193 estações estimadas no período de 2006 a 2008, na época de referência 2007,507. Ressalta-se que a adoção de uma época média para a estimativa das coordenadas se faz necessária, uma vez que a precisão das coordenadas se deteriora a medida que a época de referência definida se afasta da época média do intervalo de dados utilizado no processamento.

Neste trabalho, a época de referência do processamento dos dados foi escolhida com base na média aritmética das épocas dos dados utilizados no trabalho e com base em testes realizados com o *software* Bernese, desativando no módulo ADDNEQ2 a opção “*set up station velocities*”, que possibilita obter estimativas confiáveis das velocidades, com base nas equações normais, a partir de um intervalo de tempo razoável, considerando, para tanto, a velocidade da placa uniforme. Em Perez (2002), tem-se uma análise literal do impacto da escolha da época de referência na estimativa das coordenadas e velocidades das estações.

Com o intuito de analisar os resultados obtidos (Apêndice B), na época 4 de julho de 2007 ( $t = 2007,507$ ), realizou-se a comparação com a mais recente solução SIRGAS denominada SIR09P01, época de referência 2005,0, cujos arquivos de coordenadas (SIR09P01.CRD) e velocidades (SIR09P01.VEL) encontram-se disponíveis no endereço: <ftp://ftp.dgfi.badw-muenchen.de/pub/gps/SIRGAS/>. Nesta perspectiva, foram calculadas as discrepâncias entre essas soluções com base nas estações comuns a estas soluções e que apresentaram período superior a três anos de dados.

Desta forma, as soluções SIRGAS (2005,0) no referencial IGS05, foram atualizadas para a época de referência adotada nesta pesquisa (2007,507), com base na Equação 8, uma vez que os referenciais IGS05 e SIRGAS são compatíveis ao nível de centimétrico. As coordenadas SIRGAS atualizadas encontram-se no Apêndice C.

A Tabela 8 apresenta tais discrepâncias, bem como o erro médio, o desvio padrão e o Erro Médio Quadrático (EMQ):

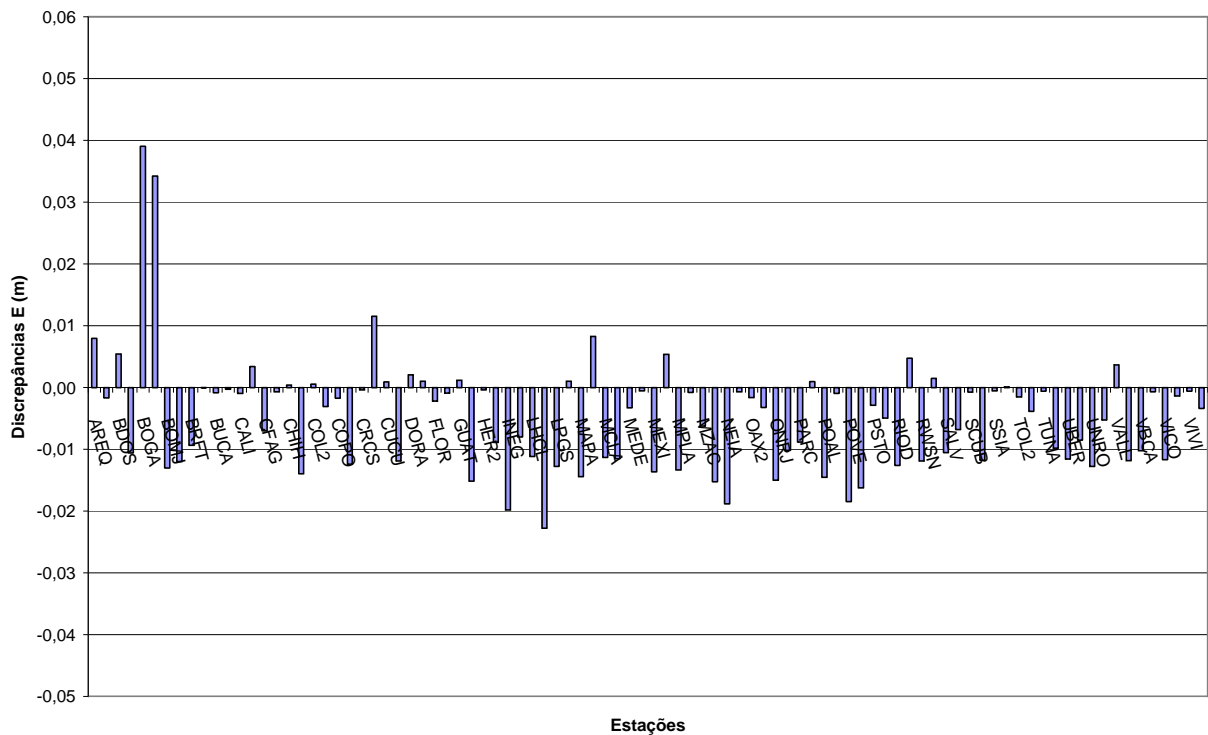
**Tabela 8** – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final do trabalho e as fornecidas pela solução SIR09P01 na época de referência (2007,507).

Discrepância (X, Y, Z) solução final – (X, Y, Z) SIR09P01				
Nº	Estação	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
1	AREQ	0,0170	-0,0259	0,0155
2	BANS	-0,0047	0,0082	0,0238
3	BDOS	-0,0074	0,0233	0,0395
4	BELE	-0,0078	-0,0071	0,0343
5	BOGA	-0,0032	0,1535	0,0467
6	BOGT	-0,0041	0,1393	0,0316
7	BOMJ	-0,0049	-0,0133	0,0341
8	BRAZ	-0,0055	-0,0119	0,0326
9	BRFT	-0,0080	-0,0056	0,0297
10	BRMU	-0,0036	0,0074	0,0151
11	BUCA	-0,0043	0,0111	0,0366
12	BUEN	-0,0035	0,0139	0,0342
13	CALI	-0,0031	0,0088	0,0370
14	CART	-0,0022	0,0223	0,0244
15	CFAG	-0,0039	-0,0091	0,0286
16	CHET	-0,0013	0,0190	-0,0045
17	CHIH	0,0013	0,0030	-0,0166
18	CHPI	-0,0056	-0,0141	0,0297
19	COL2	0,0004	-0,0006	-0,0057
20	CONZ	-0,0033	0,0002	0,0478
21	COPO	-0,0039	0,0058	0,0457
22	CRAT	-0,0147	-0,0040	0,0299
23	CRCS	-0,0046	0,0097	0,0261
24	CRO1	-0,0024	0,0319	0,0295
25	CUCU	-0,0032	0,0130	0,0347
26	CUIB	-0,0057	-0,0129	0,0319
27	DORA	-0,0021	0,0155	0,0381
28	ETCG	-0,0020	0,0295	0,0421
29	FLOR	-0,0025	0,0007	0,0221
30	GLPS	-0,0009	0,0016	0,0267
31	GUAT	0,0014	0,0199	0,0043
32	GVAL	-0,0052	-0,0157	0,0317
33	HER2	0,0018	0,0059	-0,0185
34	IMPZ	-0,0027	-0,0102	0,0313
35	INEG	-0,0003	0,0917	-0,0470
36	KOUR	-0,0171	0,0093	0,0323
37	LHCL	-0,0034	-0,0195	0,0189
38	LPAZ	0,0017	0,0702	0,0430
39	LPGS	-0,0035	-0,0185	0,0253
40	MANA	-0,0007	0,0271	0,0112
41	MAPA	-0,0060	-0,0155	0,0331
42	MARA	0,0025	0,0186	0,0317
43	MCLA	-0,0050	-0,0109	0,0302
44	MECO	-0,0022	-0,0182	0,0235
45	MEDE	-0,0037	0,0010	0,0281
46	MERI	-0,0001	-0,0638	0,0248

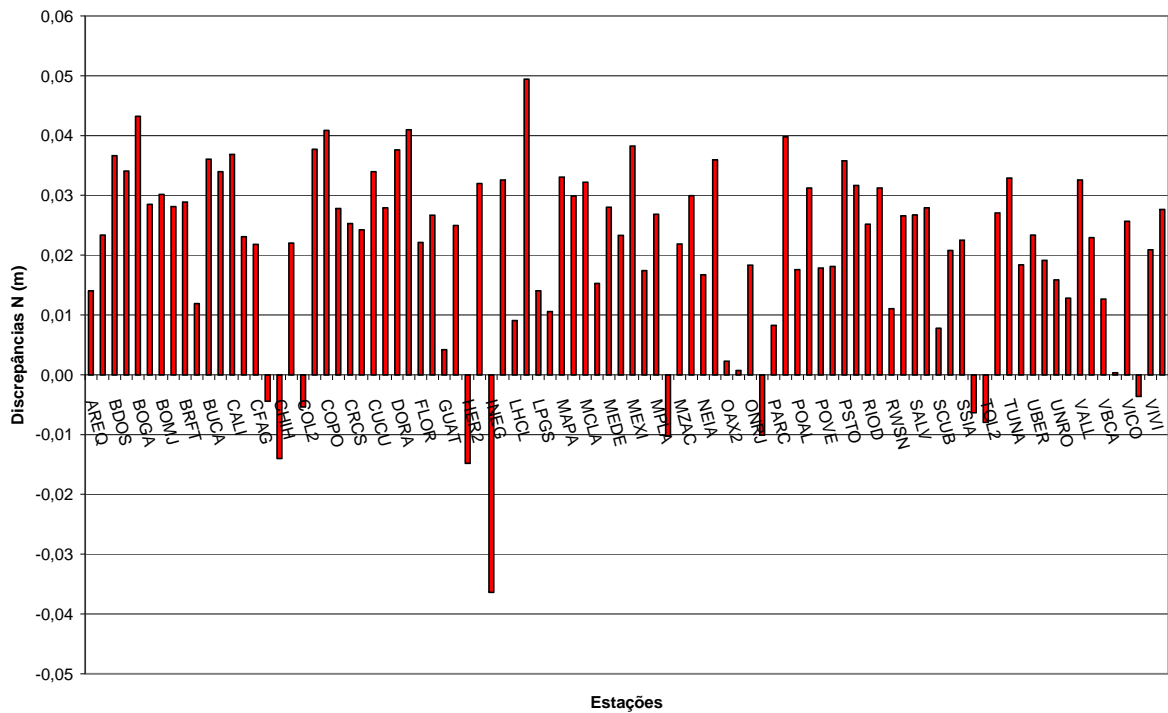
47	MEXI	0,0022	0,0364	0,0348
48	MOTE	-0,0025	0,0317	0,0187
49	MPLA	-0,0016	-0,0223	0,0240
50	MTY2	0,0002	0,0056	-0,0119
51	MZAC	-0,0033	-0,0089	0,0289
52	NAUS	-0,0038	-0,0240	0,0307
53	NEIA	-0,0068	-0,0206	0,0270
54	NEVA	-0,0032	0,0094	0,0361
55	OAX2	-0,0009	0,0063	0,0022
56	OHI2	-0,0014	-0,0038	0,0071
57	ONRJ	-0,0025	-0,0183	0,0263
58	PALM	-0,0020	-0,0192	-0,0041
59	PARC	-0,0030	-0,0183	0,0231
60	PERA	-0,0028	0,0147	0,0402
61	POAL	-0,0066	-0,0150	0,0282
62	POPA	-0,0036	0,0110	0,0313
63	POVE	-0,0046	-0,0326	0,0206
64	PPTÉ	-0,0039	-0,0212	0,0259
65	PSTO	-0,0048	0,0079	0,0358
66	RECF	-0,0055	-0,0022	0,0329
67	RIOD	-0,0057	-0,0120	0,0327
68	RIOH	-0,0026	0,0246	0,0332
69	RWSN	-0,0040	-0,0198	0,0246
70	S061	-0,0015	0,0147	0,0266
71	SALV	-0,0038	-0,0105	0,0300
72	SANT	-0,0042	-0,0085	0,0361
73	SCUB	-0,0027	0,0074	0,0087
74	SMAR	-0,0046	-0,0137	0,0301
75	SSIA	-0,0006	0,0068	0,0232
76	TAMP	0,0002	0,0010	-0,0069
77	TOL2	0,0001	0,0097	-0,0090
78	TUCU	-0,0040	-0,0005	0,0313
79	TUNA	-0,0027	0,0071	0,0332
80	UBAT	0,0017	-0,0156	0,0243
81	UBER	-0,0054	-0,0114	0,0285
82	UCOR	-0,0022	-0,0149	0,0270
83	UNRO	-0,0040	-0,0189	0,0262
84	UNSA	0,0079	-0,0298	0,0183
85	VALL	-0,0033	0,0235	0,0342
86	VARG	-0,0046	-0,0122	0,0293
87	VBCA	-0,0027	-0,0168	0,0235
88	VESL	-0,0003	-0,0007	0,0039
89	VICO	-0,0044	-0,0119	0,0320
90	VIL2	-0,0004	0,0185	-0,0041
91	VIVI	-0,0033	0,0092	0,0211
92	YOPA	-0,0022	-0,0044	0,0276
<b>Erro Médio</b>		-0,0028	0,0035	0,0238
<b>Desvio Padrão</b>		0,0038	0,0299	0,0160
<b>EMQ</b>		0,0047	0,0301	0,0286

Nota-se, com base na Tabela 8, que o EMQ é de, aproximadamente, 5 mm para a componente X e de 3 cm para as componentes Y e Z. Com relação ao erro médio, este apresentou-se maior para a componente Z com magnitude de 3 cm, o que implica na suspeita da existência de erro sistemático nessas componentes, uma vez que para a componente Z tem-se valores positivos para as discrepâncias, exceto para as estações de CHET, CHIH, COL2, HER2, INEG, MTY2, PALM, TAMP, TOL2 e VIL2. Para as componentes X e Y o erro médio atinge em torno de 3 mm.

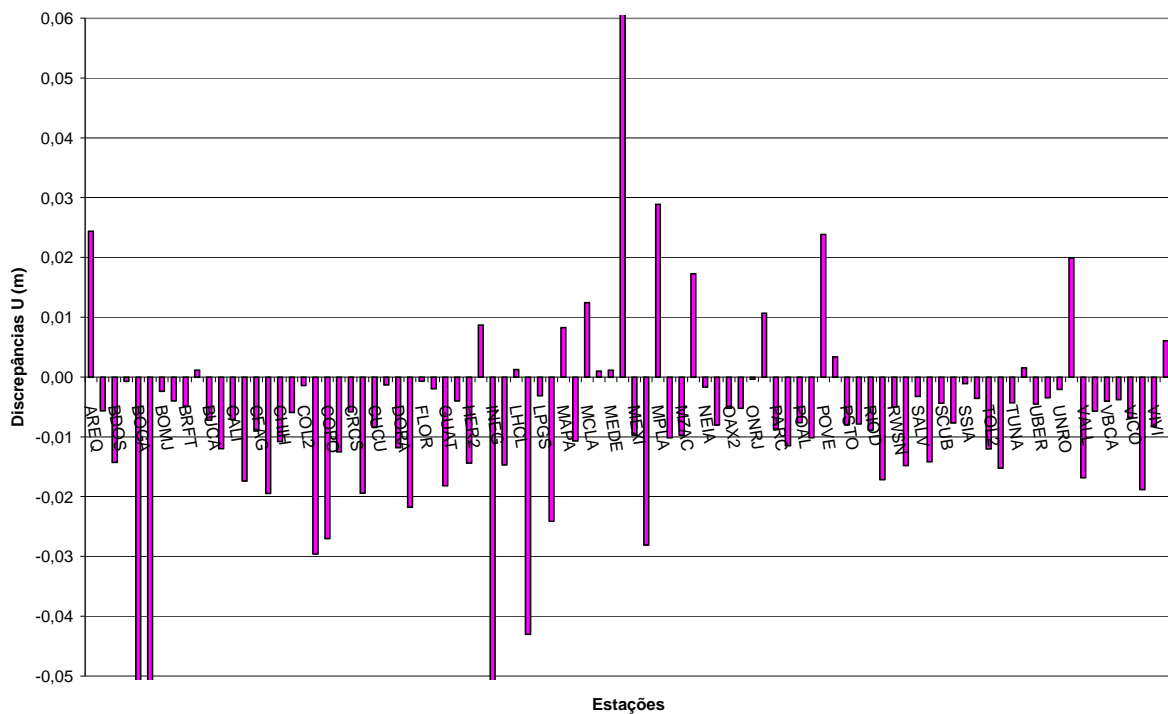
Analisando-se as discrepâncias entre as soluções obtidas neste trabalho com a solução SIRGAS (SIR09P01) no sistema local, tem-se os seguintes resultados:



**Figura 29** - Discrepâncias entre a solução final e a solução SIR09P01 na época 2007,507 para a componente Este.



**Figura 30** - Discrepâncias entre a solução final e a solução SIR09P01 na época 2007,507 para a componente Norte.

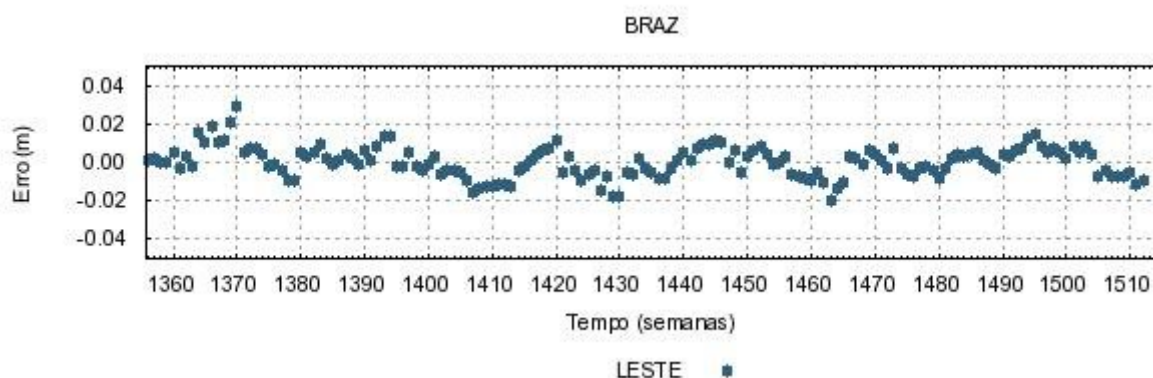


**Figura 31** - Discrepâncias entre a solução final e a solução SIR09P01 na época 2007,507 para a componente Vertical.

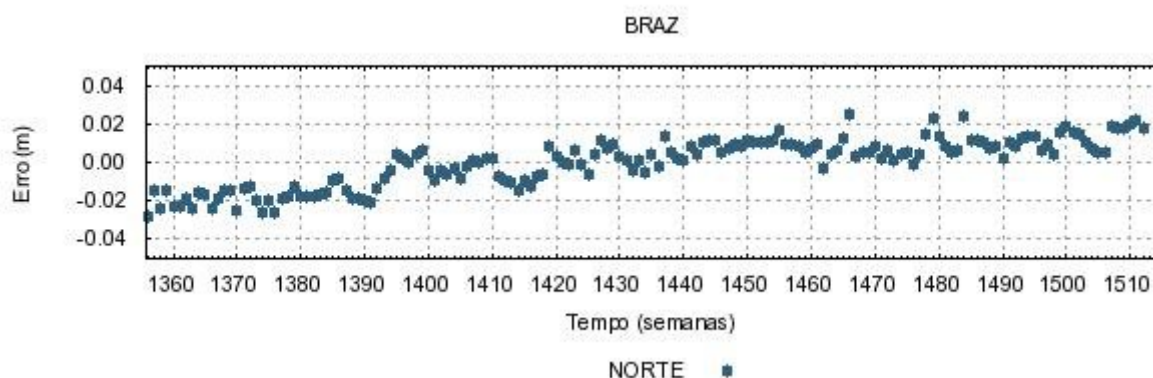


Verifica-se, com base nas Figuras 29 a 31 que a discrepância entre a solução obtida neste trabalho e a solução SIR09P01 na época 2007,507 é da ordem centimétrica. Observa-se, ainda, que embora algumas estações apresentem valores mais discrepantes, em sua maioria a magnitude destas discrepâncias é em torno de 2 cm para a componente Este, 3 cm para a componente Norte e de 1 cm para a componente vertical. As maiores discrepâncias foram observadas na componente Norte para as estações INEG e LPAZ, com 4 e 5 cm, respectivamente, na componente Este para as estações BOGA e BOGT, com discrepâncias em torno de 4 cm e para a componente vertical, as maiores discrepâncias foram observadas para as estações BOGA, BOGT, INEG, LPAZ e MERI, com magnitudes que variam em torno de 5 cm.

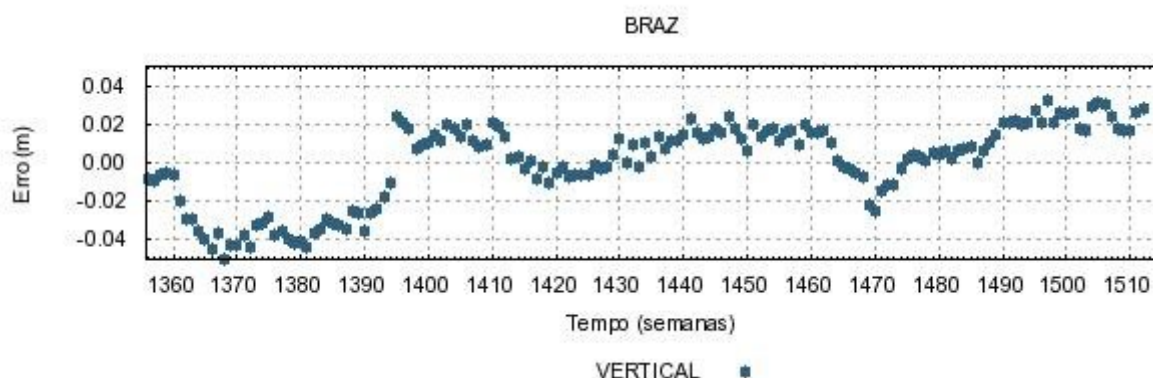
Como forma de visualizar melhor estes valores, foram geradas as séries temporais das coordenadas das estações envolvidas no processo de integração, com base nas soluções semanais fixas resultantes do processo de combinação das equações normais. Nas Figuras 32 a 34 têm-se as séries temporais para a estação BRAZ, em termos de suas coordenadas E, N e U:



**Figura 32** – Série temporal para a componente Leste da estação BRAZ.



**Figura 33** – Série temporal para a componente Norte da estação BRAZ.

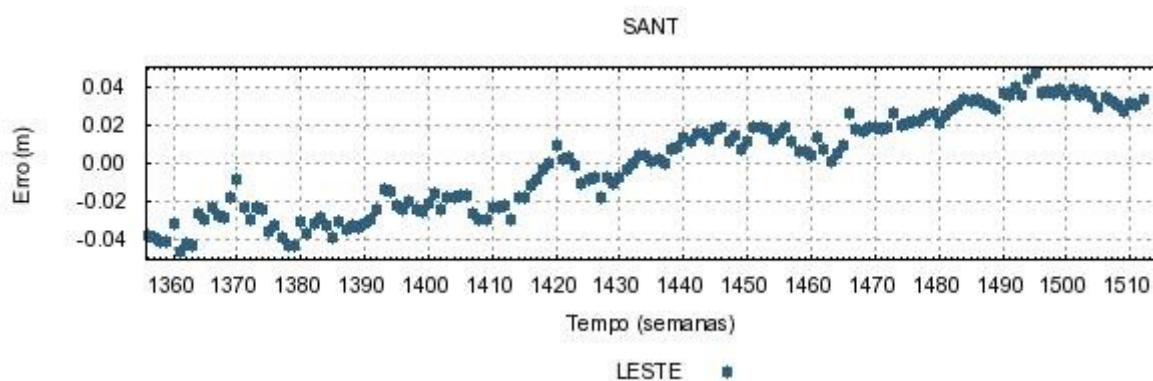


**Figura 34** – Série temporal para a componente Vertical da estação BRAZ.

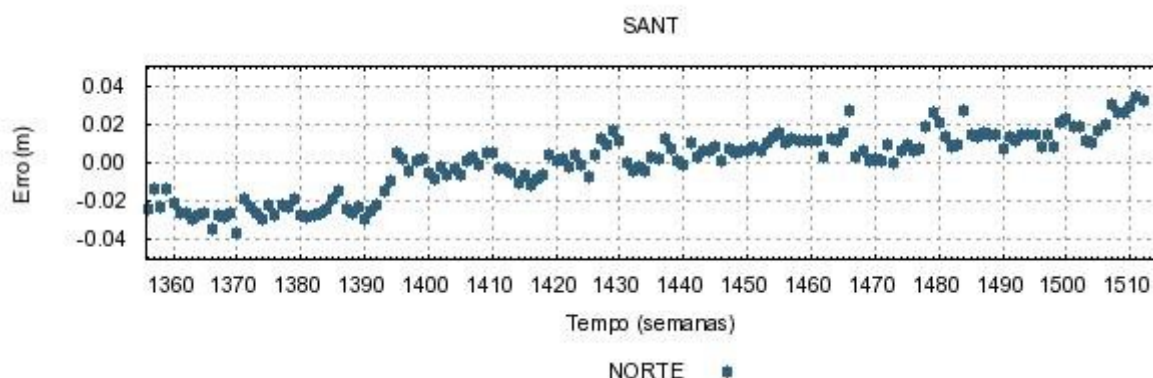
Verifica-se, que a componente Leste da estação BRAZ (Figura 32) caracteriza uma série estacionária, ou seja, sem tendência, o que implica que a influência dos fatores que fazem com que essa componente se altere com o tempo tenha a sua intensidade constante. Todavia, essa série apresenta, ainda que em menor grau, a sazonalidade, fato que também se evidencia para as componentes Norte (Figura 33) e para a componente Vertical (Figura 34). Além disso, verifica-se que para a componente Norte uma tendência linear no comportamento dos dados.

O comportamento sazonal verificado para a componente altimétrica da estação BRAZ (Figura 34) condiz com os resultados encontrados na literatura, nos quais verifica-se que o maior efeito sazonal é obtido para a componente vertical (Bevis et al. (2005); Teunissen (1998), Amiri-Simkooei (2008), Rosa (2008).

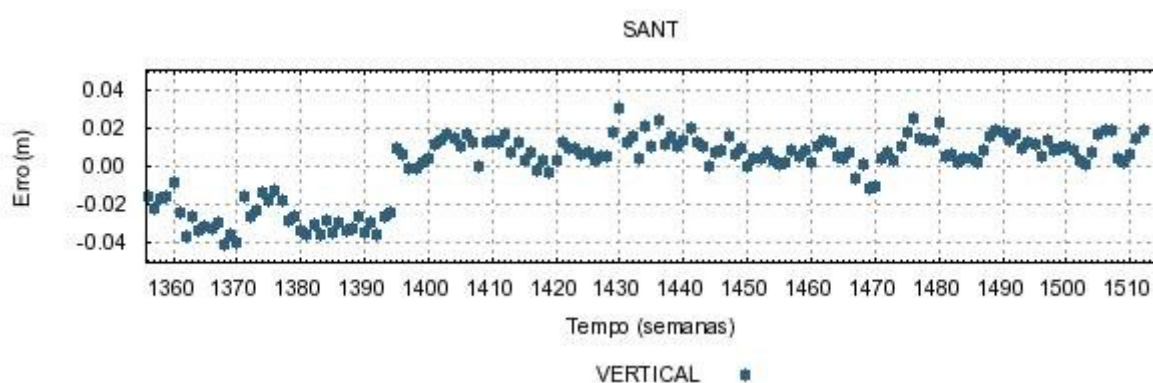
Para a estação SANT é observado, com base nas séries temporais, ilustradas nas Figuras 35 a 37, os seguintes comportamentos para as componentes E, N e U:



**Figura 35** – Série temporal para a componente Leste da estação SANT.



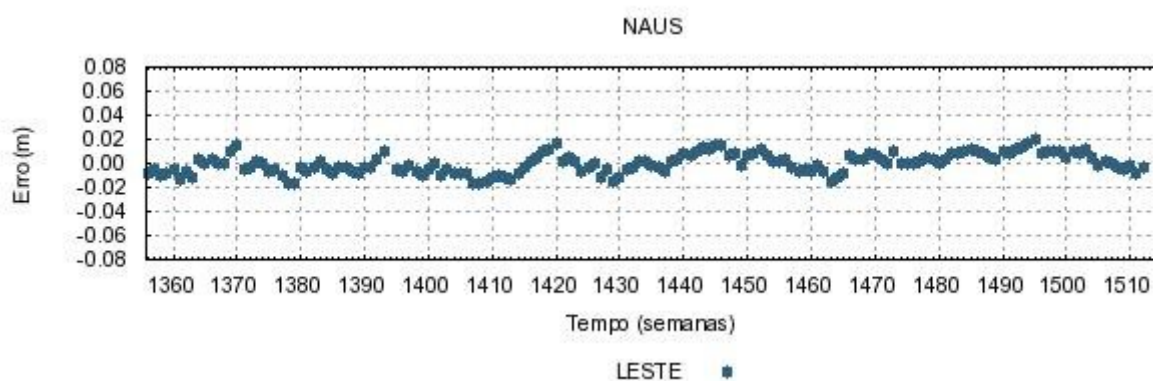
**Figura 36** – Série temporal para a componente Norte da estação SANT.



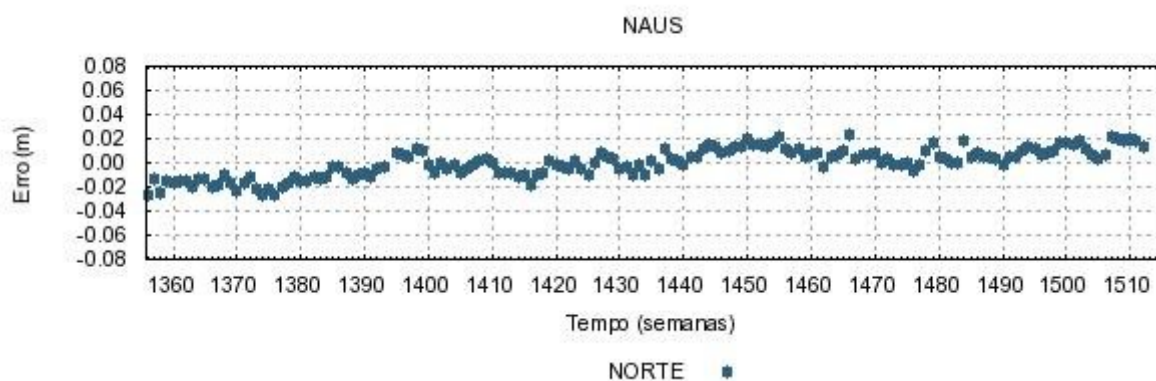
**Figura 37** – Série temporal para a componente Vertical da estação SANT.

Para a componente Leste da estação SANT (Figura 35), verifica-se a presença de tendência linear (sentido ascendente) e também a existência de sazonalidade. Um comportamento semelhante ocorre para sua componente Norte (Figura 36), ainda que em menor grau. E para a componente Vertical (Figura 37) verifica-se, como mencionado anteriormente, uma maior influência da sazonalidade.

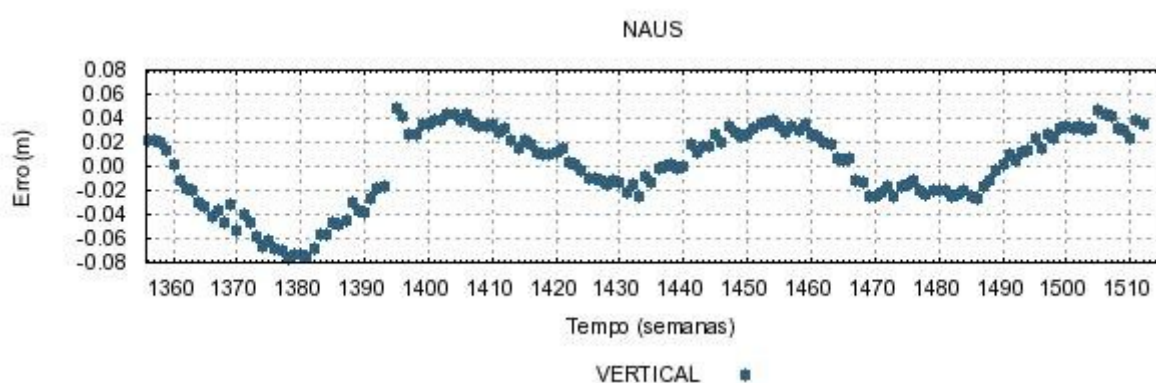
Para a estação NAUS foram geradas as séries temporais apresentadas nas Figuras 38 a 40:



**Figura 38** – Série temporal para a componente Leste da estação NAUS.

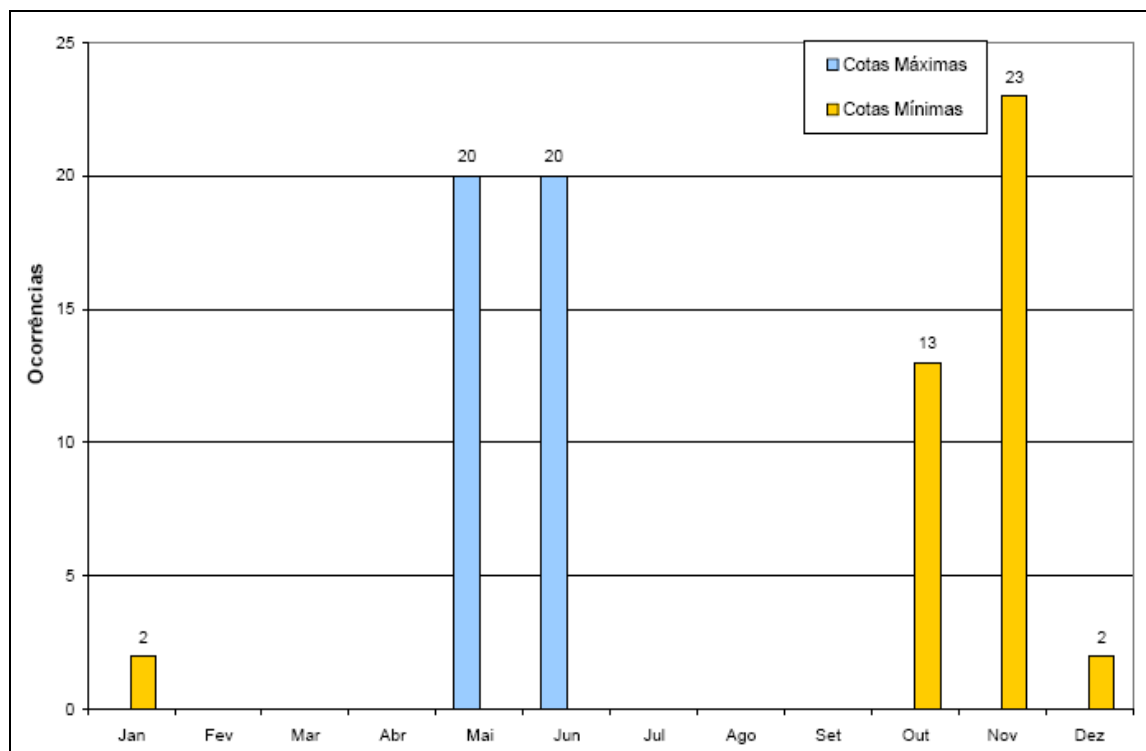


**Figura 39** – Série temporal para a componente Norte da estação NAUS.



**Figura 40** – Série temporal para a componente Vertical da estação NAUS.

Nas séries temporais da estação NAUS, verifica-se que as componentes Este (Figura 38), Norte (Figura 39) e Vertical (Figura 40) apresentam sazonalidade, sendo que a componente Norte apresenta ainda a tendência. Apesar do período de dados analisados (3 anos), o comportamento altimétrico da estação NAUS (Figura 40) mostra a relação existente entre a altitude desta estação e dados liminológicos do Rio Amazonas, como ilustra a Figura 41:



**Figura 41** – Distribuição mensal das ocorrências de cotas máximas e mínimas anuais para o Rio Amazonas com base em dados da estação de monitoramento Óbidos para o período de 1968 a 2009.

**Fonte:** ANA (2009).

Nos períodos de cota máxima (maio a junho) o volume de água do Rio Amazonas aumenta, o que conduz a um deslocamento vertical para a componente altimétrica de, aproximadamente, 8 cm. Para os períodos de cota mínima (outubro a janeiro), que compreendem o período de estiagem do Rio Amazonas, a componente altimétrica tende a sofrer um deslocamento vertical para cima de no máximo 5 cm (para o período de dados analisados), o que caracteriza a anti-correlação existente entre a componente altimétrica da estação com o volume de água do Rio Amazonas. Esta análise é condizente e compatível com resultados encontrados na literatura: Bevis et al. (2005); Rosa (2008); Costa et al. (2007); Amiri-Simkooei (2008).

Como forma de exemplificar a variação temporal das coordenadas das estações envolvidas no processamento foram geradas as séries temporais de 14 das 193 estações envolvidas neste trabalho como: BOMJ, CUIB, CRO1, IMPZ, LPGS, OHI2, VICO, PPTE, SJRP, ROSA, OURI, ILHA, LINS e KOUR, as quais encontram-se ilustradas no Apêndice D.

Posteriormente, foram estimadas as velocidades de 92 das 193 estações envolvidas ao longo do processo de integração de soluções, uma vez que apresentaram um período e quantidade de dados de no mínimo 3 anos. As velocidades dessas estações, em termos de

suas componentes cartesianas, encontram-se no Apêndice E. As discrepâncias entre as velocidades obtidas neste trabalho em relação as velocidades SIR09P01 encontram-se descritas na Tabela 9:

**Tabela 9** – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final do trabalho e as fornecidas pela solução SIR09P01.

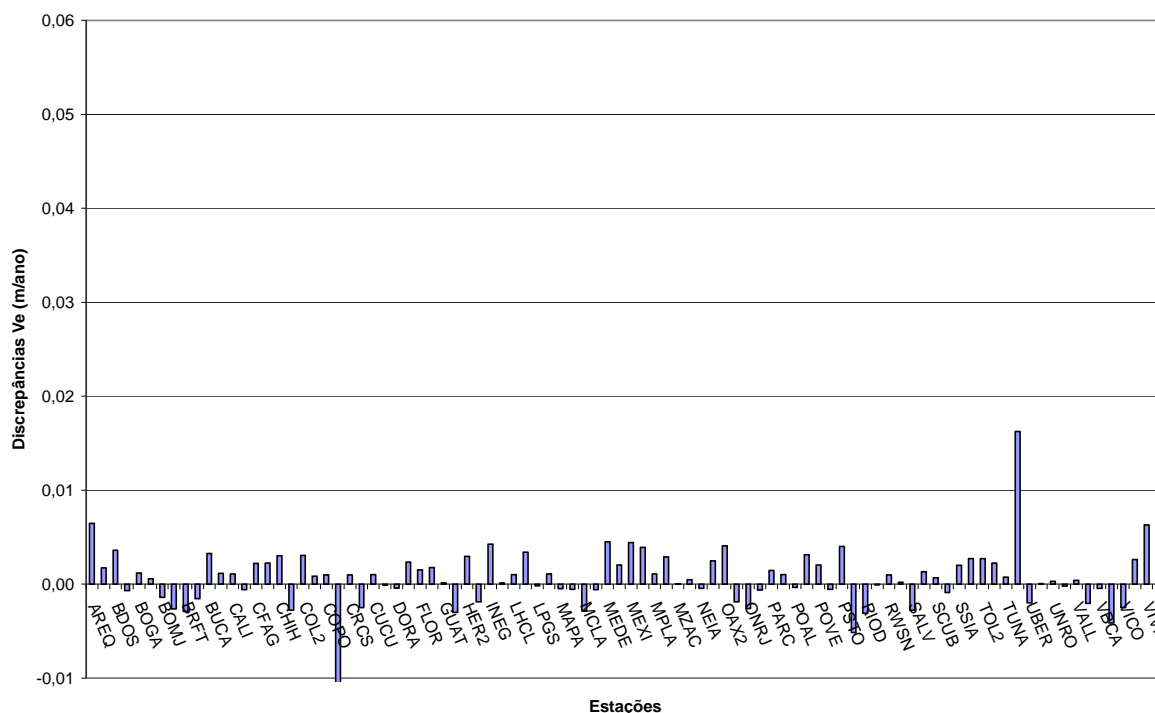
Discrepância $(VX, VY, VZ)_{\text{solução final}} - (VX, VY, VZ)_{\text{SIR09P01}}$				
Nº	Estação	DVX (m/ano)	DVY (m/ano)	DVZ (m/ano)
1	AREQ	0,0100	-0,0095	0,0003
2	BANS	0,0068	-0,0138	0,0008
3	BDOS	0,0091	-0,0084	0,0010
4	BELE	0,0081	-0,0102	-0,0003
5	BOGA	0,0047	-0,0122	-0,0016
6	BOGT	0,0037	-0,0109	-0,0004
7	BOMJ	0,0051	-0,0068	-0,0023
8	BRAZ	0,0062	-0,0108	-0,0037
9	BRFT	0,0078	-0,0099	-0,0044
10	BRMU	0,0051	-0,0144	0,0043
11	BUCA	0,0061	-0,0089	0,0015
12	BUEN	0,0046	-0,0149	-0,0006
13	CALI	0,0050	-0,0163	-0,0012
14	CART	0,0024	-0,0117	0,0001
15	CFAG	0,0047	-0,0058	-0,0027
16	CHET	0,0026	-0,0122	0,0027
17	CHIH	0,0003	-0,0099	0,0032
18	CHPI	0,0068	-0,0107	-0,0049
19	COL2	0,0007	-0,0101	0,0023
20	CONZ	0,0041	-0,0105	-0,0063
21	COPO	0,0033	-0,0063	-0,0028
22	CRAT	-0,0048	-0,0116	-0,0022
23	CRCS	0,0059	-0,0114	0,0010
24	CRO1	0,0018	-0,0096	0,0009
25	CUCU	0,0048	-0,0119	0,0006
26	CUIB	0,0062	-0,0094	-0,0033
27	DORA	0,0067	-0,0260	-0,0001
28	ETCG	0,0034	-0,0101	0,0007
29	FLOR	0,0033	-0,0067	-0,0008
30	GLPS	0,0017	-0,0114	-0,0023
31	GUAT	0,0000	-0,0150	-0,0002
32	GVAL	0,0065	-0,0099	-0,0036
33	HER2	-0,0006	-0,0098	0,0031
34	IMPZ	0,0033	-0,0064	-0,0012
35	INEG	0,0021	-0,0104	0,0016
36	KOUR	0,0176	-0,0230	0,0004
37	LHCL	0,0039	-0,0061	-0,0026
38	LPAZ	-0,0003	-0,0106	0,0025
39	LPGS	0,0066	-0,0109	-0,0077

40	MANA	0,0020	-0,0138	0,0005
41	MAPA	0,0055	-0,0076	-0,0012
42	MARA	0,0022	-0,0084	0,0016
43	MCLA	0,0064	-0,0101	-0,0031
44	MECO	0,0029	-0,0058	-0,0013
45	MEDE	0,0069	-0,0088	0,0017
46	MERI	0,0021	-0,0114	0,0026
47	MEXI	-0,0011	-0,0126	0,0071
48	MOTE	0,0062	-0,0086	0,0009
49	MPLA	0,0068	-0,0087	-0,0003
50	MTY2	0,0012	-0,0096	0,0026
51	MZAC	0,0037	-0,0095	-0,0052
52	NAUS	0,0025	-0,0034	-0,0011
53	NEIA	0,0078	-0,0093	-0,0041
54	NEVA	0,0047	-0,0082	0,0014
55	OAX2	0,0027	-0,0118	0,0042
56	OHI2	0,0011	-0,0053	-0,0046
57	ONRJ	0,0026	-0,0060	-0,0009
58	PALM	0,0022	-0,0060	-0,0083
59	PARC	0,0041	-0,0074	-0,0042
60	PERA	0,0042	-0,0124	-0,0005
61	POAL	0,0067	-0,0089	-0,0046
62	POPA	0,0050	-0,0076	0,0003
63	POVE	0,0049	-0,0054	-0,0009
64	PPTA	0,0043	-0,0063	-0,0015
65	PSTO	0,0058	-0,0075	0,0011
66	RECF	0,0056	-0,0102	-0,0028
67	RIOD	0,0062	-0,0101	-0,0034
68	RIOH	0,0051	-0,0168	0,0011
69	RWSN	0,0049	-0,0083	-0,0067
70	S061	0,0024	-0,0108	-0,0015
71	SALV	0,0099	-0,0114	-0,0041
72	SANT	0,0039	-0,0071	-0,0042
73	SCUB	0,0035	-0,0110	0,0012
74	SMAR	0,0047	-0,0079	-0,0040
75	SSIA	0,0022	-0,0133	-0,0024
76	TAMP	0,0014	-0,0097	0,0022
77	TOL2	0,0011	-0,0097	0,0026
78	TUCU	0,0044	-0,0042	-0,0010
79	TUNA	0,0041	-0,0112	-0,0006
80	UBAT	0,0240	-0,0011	-0,0035
81	UBER	0,0060	-0,0097	-0,0037
82	UCOR	0,0026	-0,0053	-0,0030
83	UNRO	0,0048	-0,0079	-0,0046
84	UNSA	0,0200	-0,0442	-0,0212
85	VALL	0,0046	-0,0139	0,0008
86	VARG	0,0044	-0,0074	-0,0032
87	VBCA	0,0033	-0,0073	-0,0031
88	VESL	-0,0013	-0,0042	0,0026

89	VICO	0,0054	-0,0084	-0,0024
90	VIL2	0,0019	-0,0139	0,0027
91	VIVI	0,0091	-0,0086	-0,0024
92	YOPA	0,0098	-0,0121	0,0030
<b>Erro médio</b>		0,0047	-0,0102	-0,0012
<b>Desvio Padrão</b>		0,0039	0,0051	0,0035
<b>EMQ</b>		0,0061	0,0114	0,0037

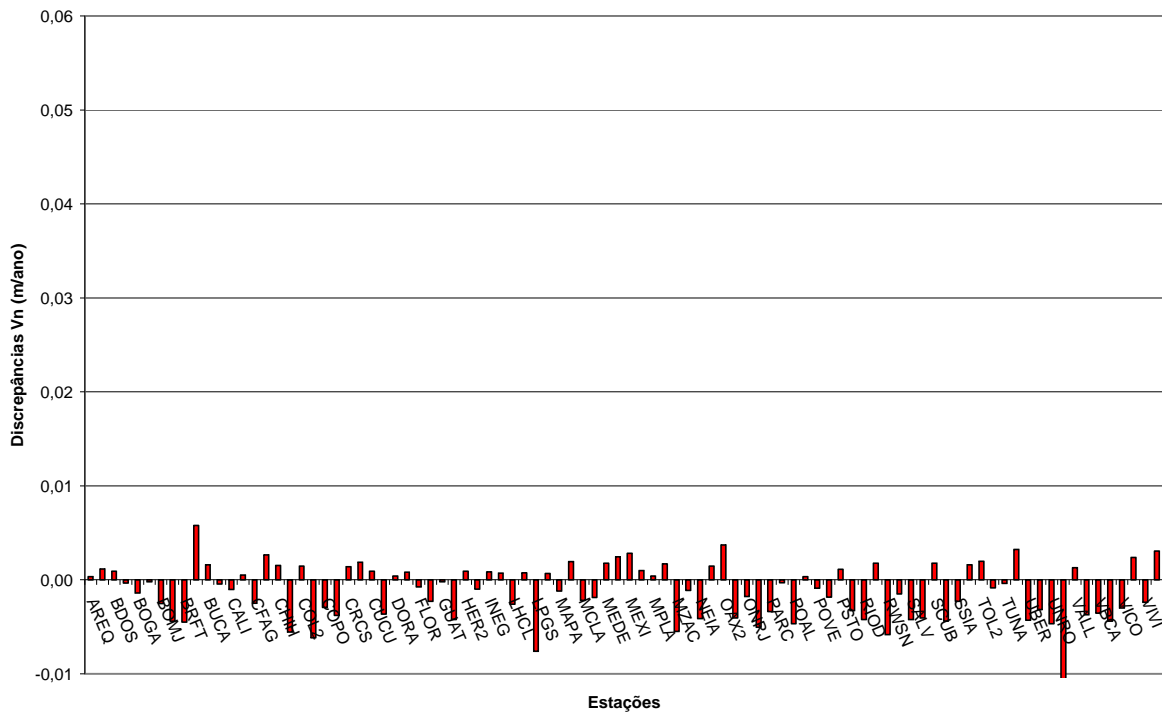
Nota-se, com base na Tabela 9, que o EMQ é de, aproximadamente, 6 mm para a componente  $V_x$ , 1 cm para a componente  $V_y$  e de 3 mm para  $V_z$ . Com relação ao erro médio, este apresentou-se maior para a componente Y com magnitude de, aproximadamente, 1 cm, o que implica na suspeita da existência de erro sistemático nessa componente, uma vez que para a componente Y tem-se, em sua maioria, valores negativos para as discrepâncias. Para as componentes X e Z o erro médio atinge em torno de 4 e 1 mm, respectivamente.

Analisando-se as discrepâncias entre as soluções de velocidades obtidas com a SIR09P01, no sistema local, tem-se os seguintes resultados:

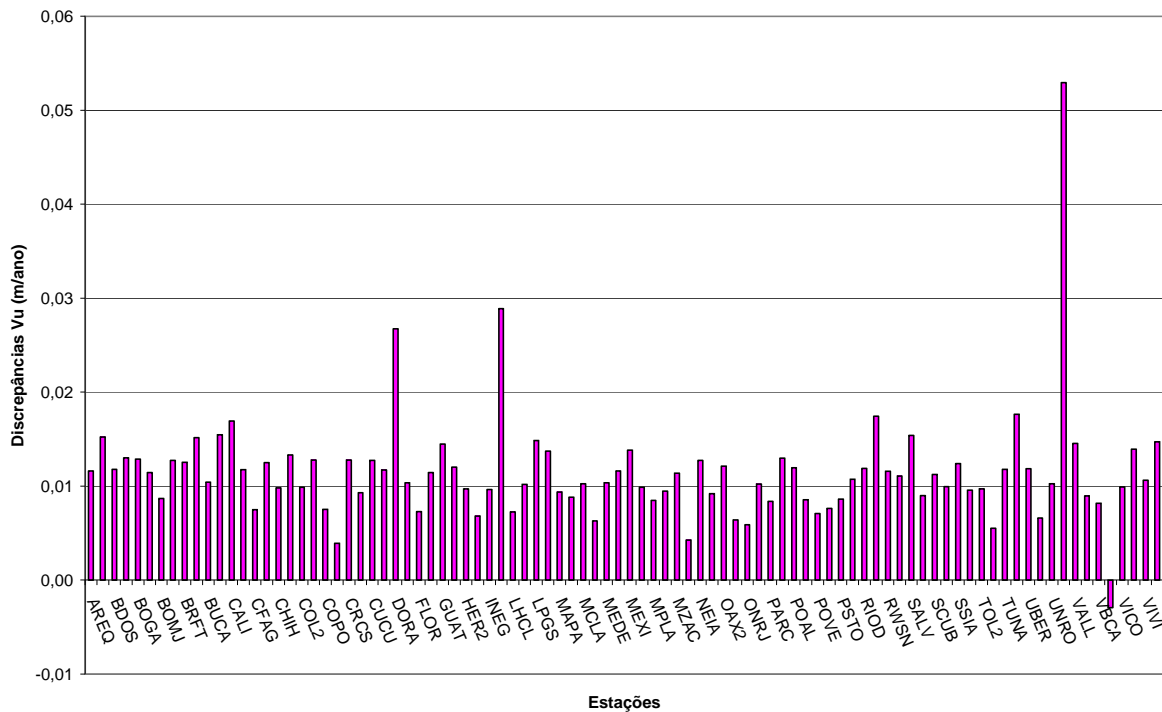


**Figura 42** - Discrepâncias entre velocidade obtida e a velocidade SIR09P01 para a componente Este.



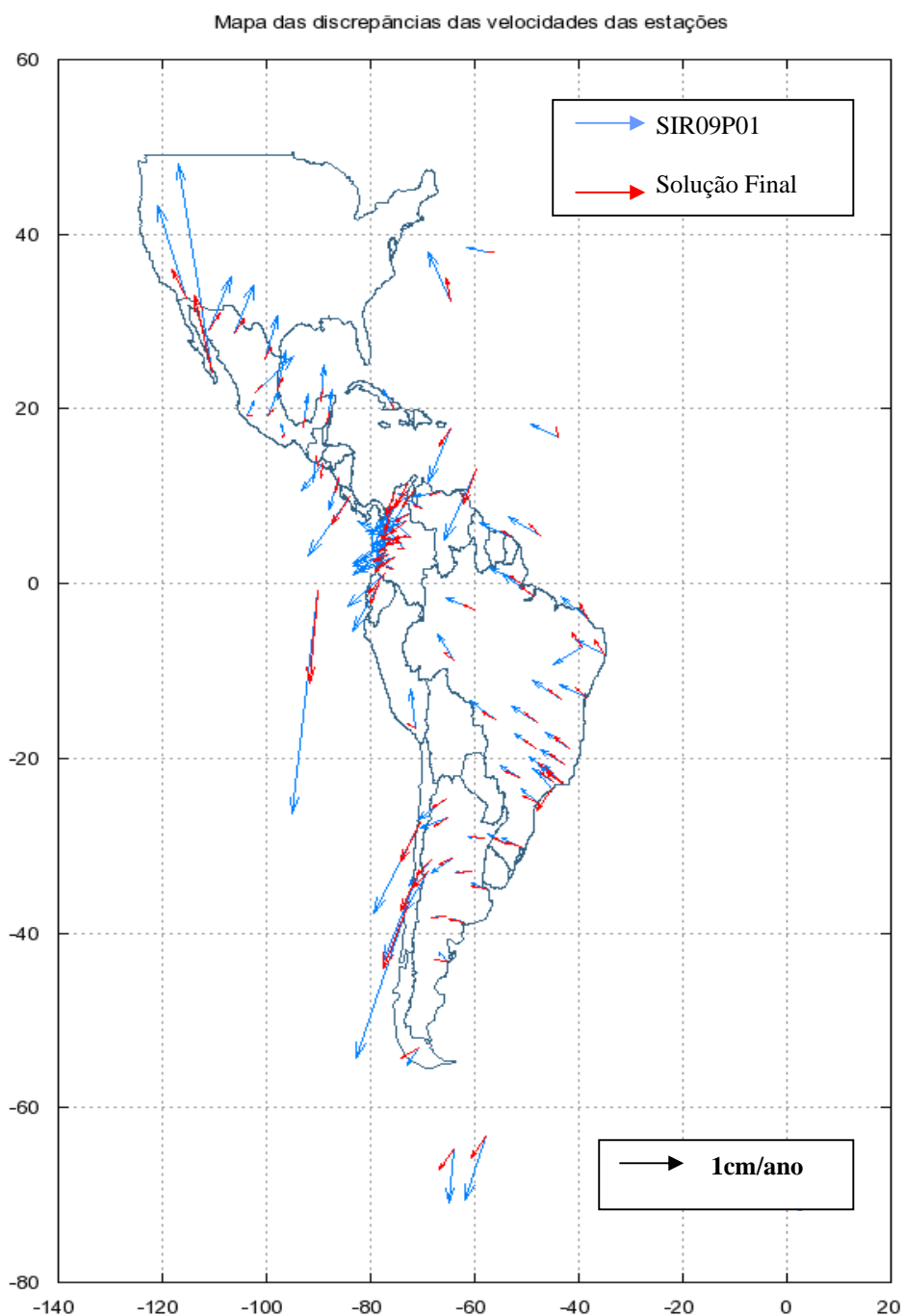


**Figura 43** - Discrepâncias entre velocidade obtida e a velocidade SIR09P01 para a componente Norte.



**Figura 44** - Discrepâncias entre velocidade obtida e a velocidade SIR09P01 para a componente Vertical.

Como pode-se verificar nas Figuras 42 a 44, as maiores discrepâncias são observadas para a componente vertical no referencial local, podendo atingir até 5 cm/ano como, por exemplo, para a estação UNSA. Como forma de ilustrar o comportamento da velocidade obtida, em termos de suas resultantes no sistema local, em relação a solução SIR09P01, foi gerado um mapa das discrepâncias das velocidades das estações envolvidas, como ilustra a Figura 45:



**Figura 45** – Mapa das discrepâncias obtidas entre as velocidades das estações estimadas e a solução SIR09P01.

Verifica-se, em geral, que as discrepâncias observadas para as demais estações fica em torno de 1 a 2 cm ao ano, valores que estão de acordo com os encontrados na literatura (FORTES et al., 2006). Além disso, observa-se que o campo de velocidades resultantes gerado pela solução final é muito semelhante ao obtido pela solução SIR09P01, no que concerne ao sentido destes vetores, porém a solução obtida apresenta maior magnitude, fato possivelmente relacionado ao menor período de dados que envolve a solução obtida (3 anos de dados) quando comparado a solução SIRGAS.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta dissertação, buscou-se elaborar uma metodologia de integração entre redes GNSS de natureza distintas, com base na combinação das equações normais obtidas no processamento de dados da rede local e na reconstrução das equações normais de redes globais, resultantes de processamentos realizados pelos centros de análise distribuídos mundialmente e que, posteriormente, são combinadas semanalmente, gerando uma única solução regional e disponibilizadas no formato SINEX. Para tanto, buscou-se modelar os principais erros envolvidos no posicionamento GNSS utilizando-se a técnica de posicionamento relativo, com base em convenções adotadas internacionalmente pelos centros de análise do IERS.

Como estudo de caso, nesta pesquisa foram empregados para o período de 3 anos (2006 a 2008) dados da solução regional SIRGAS (IGS-RNAAC-SIR), disponibilizados no formato SINEX, e das redes RBMC e GNSS SP no formato RINEX. Para tanto, foram realizados experimentos à partir de *scripts* elaborados para a depuração de erros e aplicação das correções referentes aos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, bem como o processamento e a combinação das soluções GNSS utilizando-se o *software* científico Bernese 5.0, que permite o processamento de redes geodésicas de alta precisão.

No que concerne a aplicação da correção dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera, verifica-se, com base nos experimentos da Seção 6.1, que não há uma melhora significativa na obtenção das coordenadas ajustadas, ou seja, as correções atingem valores milimétricos. Contudo, no posicionamento de redes GNSS de alta precisão, tais correções são necessárias. Neste contexto, destaca-se a participação das estações da RBMC no processo de densificação da rede SIRGAS na América do Sul, cujas coordenadas apresentam precisões milimétricas, embora as correções dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera não tenham sido aplicadas, conduzindo conseqüentemente à efeitos sistemáticos na estimativa de suas coordenadas.

Quanto à obtenção e análise das soluções integradas verifica-se que embora o período de dados seja de apenas 3 anos (2006 a 2008), pode-se avaliar o comportamento temporal das coordenadas das estações, com base nas séries temporais, e identificar a presença de efeitos sazonais e locais que afetam em especial a componente vertical (Seção 6.2). Contudo, o estudo da variação temporal das coordenadas requer um período de dados superior ao utilizado nesta pesquisa, bem como à utilização de dados qualitativos associados ao clima, localização geográfica, incidência de fenômenos geofísicos, geomorfologia, em especial em um país com extensões continentais como o Brasil.

A estimativa das coordenadas finais se deu com base na escolha de uma época média durante o processo de ajustamento, como recomendado na literatura, contribuindo com a obtenção de coordenadas mais precisas. No que diz respeito à estimativa da velocidade das estações, observou-se que embora os resultados estejam condizentes com os valores encontrados na literatura, entende-se que para a obtenção de valores mais realistas e que contribuam à estudos geodinâmicos seja necessário dispor de um período mais longo de observações, que varia de 5 anos ou mais, como verifica-se em trabalhos realizados pelo DGFI e por alguns pesquisadores como Costa (1999) e Perez (2002).

Complementarmente, realizou-se a comparação dos resultados obtidos (coordenadas e velocidades das estações) com a mais recente solução multi-anual SIRGAS. Verificou-se que os valores obtidos são precisos e compatíveis com os resultados determinados por outros centros de processamento, apresentando discrepâncias da ordem de centímetros.

Cabe acrescentar, ainda, algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros, visando aprimorar os resultados obtidos nessa pesquisa. Dentre elas, pode-se citar:

- Automatização do processo de combinação, com base na metodologia proposta;
- Escolha de período maior de dados para a estimativa e análise das coordenadas e velocidade das estações;
- Implementar e testar outras funções de mapeamento da troposfera. Atualmente, tem-se recomendado a aplicação da função Viena;
- Aplicação da condição NNR para estudos que envolvam diversas placas litosféricas;
- Utilização das órbitas IGS reprocessadas com base nos modelos e convenções atuais;
- Adoção dos modelos de calibração absoluta e atualização dos parâmetros adequados das antenas das estações, quando houver a troca de antena;
- Disponibilizar soluções semanais direcionadas à aplicações práticas (coordenadas) e científicas (SINEX), contribuindo à manutenção da rede SIRGAS na América do Sul, em especial no Brasil;
- Continuação dos experimentos realizados nessa pesquisa, com o estudo mais detalhado das séries temporais obtidas com base nas soluções integradas, investigando os fatores condicionantes dos efeitos sazonais que afetam a estimativa das coordenadas das estações, em especial, a componente altimétrica, buscando agregar conhecimentos geofísicos e geomorfológicos de cada região;

Ressalta-se, ainda, que ao longo do desenvolvimento desta pesquisa foram encontradas algumas inconsistências e dificuldades no processo de integração de redes utilizando-se o *software* Bernese 5.0. Para o período analisado, evidenciou-se incoerências nas soluções SIRGAS geradas por centros de processamentos distintos no que se refere ao código da estação, tipo de receptor e antena, o que conduz a erros no processo de integração e na necessidade de elaboração de *scripts* que solucionem estes problemas. Com base nessa problemática verifica-se, atualmente, à efetiva mobilização dos diferentes centros de processamento envolvidos para a padronização das soluções geradas junto à rede SIRGAS-CON.

Finalizando, vale salientar que atualmente a FCT/UNESP tem uma infra-estrutura que possibilita a continuação e aprimoramento dessa pesquisa, contribuindo efetivamente a densificação da rede SIRGAS na América do Sul com o desenvolvimento de pesquisas nas mais diversas sub-áreas das geociências, bem como para atividades de fins práticos como Cadastro, SIG, entre outras, uma vez que possibilita que um vasto número de estações tenha suas coordenadas e velocidades estimadas continuamente, contribuindo não apenas em um ganho computacional no processamento de redes, mas ao processo de densificação de redes.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Óbidos (rio Amazonas):** monitoramento hidrológico de 2009. Boletim n. 4, 28/04/2009.

AKROUR, B.; SANTERRE, R.; GEIGER, A. Calibrating antenna phase centers. **GPS World**. 2005. Disponível em: <http://gpsworld.com>. Acesso: dez/2007.

ALTAMINI, Z.; BOUCHER, C.; DREWES, F.; FERLAND, R.; LARSON, K. RAY, J.; ROTHACHER, M. Combination of station positions and velocities. **IERS Technical Note**, n. 30, 2002.

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; LEGRAND, J.; GARAYT, B.; BOUCHER, C. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, **Journal of Geophysical Research**, n. 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949. 2007. Disponível em: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2007/2007JB004949.shtml>. Acesso: abr/2009.

AMIRI-SIMKOOEI, A.R. Noise in multivariate GPS position time-series. **Journal of Geodesy**, n. 112, 13p., 2008.

BASSIRI, S.; HAJJ, G. A. Higher-order ionospheric effects on the global positioning systems observables and means of modeling them, **Manuscr. Geod.**, v. 18, p.280-289, 1993.

BEVIS, M.;ALSDORF, D.;KENDRICK, E.;FORTES, L. P.; FORSBERG, B.;SMALLEY Jr., R.; BECKER, J. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Journal of Geophysical Research**, v. 32, L16308, doi:10.1029/2005GL023491, 2005.

BERNESE GPS SOFTWARE – Version 5.0 (BERNESE). Tutorial. 2007. Disponível em: <http://www.bernese.unibe.ch/download.html>>. Acesso em: mar/2008.

BOCK, Y. Reference System, In: KLEUSBER, A. TEUNISSEN, P. J. G., **GPS for Geodesy**. 2ª Edition, Berlin: Springer, 1996.

BOEHM, J.; SCHUH, F. Vienna Mapping functions in VLBI analyses. **Geophys Re. Lett.**, 31:L01603. doi: 10.1029/2003GL018984, 2004.

BOEHM, J.; CERVEIRA, J. M.; SCHUH, F.; TREGONING, P. The impact of tropospheric mapping functions based on numerical weather models on the determination of geodetic parameters, **IAG Proceedings**, Cairns, 2005. Disponível em: [http://www.rses.anu.edu.au/geodynamics/gps/papers/2005\\_boehm\\_cairns\\_a.pdf](http://www.rses.anu.edu.au/geodynamics/gps/papers/2005_boehm_cairns_a.pdf). Acesso: nov/2008.

BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, F. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, **Journal of Geophysical Research**, v. 111, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629, 2006.

BOEHM, J.; NIELL, A. E.; SCHUH, F.; TESMER, V.; TREGONING, P. Mapping functions for atmospheric delay modeling in GNSS analysis. **IGS Workshop**, Darmstadt, 2006. Disponível em: [ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/resource/pubs/06\\_darmstadt/IGS%20WS%202006%20Papers%20PDF/11\\_Boehm\\_2006Darmstadt\\_all\\_final.pdf](ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/resource/pubs/06_darmstadt/IGS%20WS%202006%20Papers%20PDF/11_Boehm_2006Darmstadt_all_final.pdf). Acesso: jan/2008.

BRUNINI, C.; SÁNCHEZ, L. SIRGAS: Sistema de referência Geocêntrico para as Américas. **Boletim Informativo**, n. 12, 2007.

CAMARGO, P.O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência**. 1999. 166f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CARARO, A. C. **Correções relativísticas sobre as medidas de tempo GPS**. 2006. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CIRAULO, L.; AZPILICUETA, F.; BRUNINI, C.; MEZA, A.; RADICELLA, S. M. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. **Journal of Geodesy**. v. 81, n. 2, p. 111-120, fev. 2007.

COSTA, S. M. A., **Integração da rede geodésica brasileira aos sistemas de referência terrestres**. 1999. 170f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

COSTA, S. M. A.; SILVA, A. L.; LAGO, G. N. Primeiro ano de atividades do centro de processamento SIRGAS – IBGE. **XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia**, Rio de Janeiro, Brasil, 21 a 24 de outubro de 2007, p. 173-180.

FAUSTINO, R. C.; ALVES, D. B. M. ; SOUZA, E. M.; HOLZSCHUH, M. L.; RUI, R. S.; MONICO, J. F. G. MOVIMENTO DE PLACAS LITOSFÉRICAS:ANÁLISE DOS



MODELOS DISPONÍVEIS PARA O BRASIL. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005, Macaé: Sociedade Brasileira de Cartografia, v. 1. p. 1-8, 2005.

FAUSTINO, R. C. **Posicionamento por ponto preciso estático e cinemático: implementação e análise.** 2006. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

FORTES, L. P.; LAURIA, E.; BRUNINI, C. ; AMAYA, W ; SÁNCHEZ, L. ; DREWES, H. ; SEEMÜLLER, W. Current status and future developments of the SIRGAS Project. **Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover**, Nr. 258: p. 59-70, 2006. Acesso: mar/2007. Disponível em: [http://www.ife.uni-annover.de/mitarbeiter/seeber/seeber\\_65/pdf\\_65/fort6.pdf](http://www.ife.uni-annover.de/mitarbeiter/seeber/seeber_65/pdf_65/fort6.pdf).

FREIBERGER JUNIOR, J. **Antenas de receptores GPS: características gerais.** Curso de Extensão: Error Sources in Highly Precise GPS Positioning. Setor de Ciências da Terra. Departamento de Geomática. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba: UFPR, 2004.

FRITSCHÉ, M.; DIETRICH, R.; KNÖFEL, C.; RÜLKE, A.; VEY, S.; ROTACHER, M.; STEIGENBERGER, P. Impact of higher-order ionospheric terms of GPS estimates, **Geophysical Research Letters**, v. 32, L23311, doi: 10.29/2005GL024342, dez. 2005.

GRUPO DE ESTUDOS EM GEODÉSIA ESPACIAL (GEGE). 2009. Disponível em: <http://gege.prudente.unesp.br>. Acesso: mar/2009.

GEMAEL, C. **Ajustamento de observações: aplicações à Geodésia.** Curitiba: UFPR, 1994. 320p.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia física.** Curitiba: Editora UFPR, 1999. 302p.

GOAD, C. Surveying with the Global Positioning System. In PARKINSON, B. W.; SPILKER JR, J. J. **Global Positioning System: Theory and applications.** Washington: American Institute of Aeronautics, 1996. v. 1, Cap. 18.

GÖRRES, B.; J. CAMPBELL; M. BECKER; M. SIEMES. Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. **GPS Solutions**. N. 10. 2006. p. 146-145.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ORÚS, R.; SALAZAR, D. **Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning.** Barcelona,

Spain. Research group of Astronomy and Geomatics – Technical University of Catalonia, 2005.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, F.; COLINS, J. **GPS: theory and practice**. 5.ed. Wien: Springer, 2001. 382p.

INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME (ITRF). 2009. **Transformation Parameters between ITRF2005 and ITRF2000**. Disponível em: [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/tp\\_05-00.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php) . Acesso: abr/2009.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). 2009. **RIBaC – Rede INCRA de Bases Comunitárias do GPS**. Disponível em: <http://ribac.incra.gov.br/ribac>. Acesso: abr/2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Resolução Nº 23**, de 21 de fevereiro de 1989. Altera o apêndice II da R.PR-22/83. 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Proposta preliminar para a adoção de um referencial geocêntrico no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul – SIRGAS. Boletim Informativo nº 6**. Rio de Janeiro, fev. 2002. 35p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/publicacao.ht>>. Acesso em: mai/2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **O sistema de referência SIRGAS2000**. Belo Horizonte: IBGE, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Resolução do Presidente – 1/2005**: altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Artigo 24 do Estatuto aprovado pelo Decreto n. 4.740, de 13 de junho de 2003. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/RBMC\\_2009.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/RBMC_2009.pdf)>. 2009. Acesso: nov/2009.

JENSEN, A. B. O.; TSCHERNING, C. C.; MADSEN, F. 2002. Integrating numerical weather predictions in GPS positioning. **ENC GNSS-2002**, Copenhagen, May, 2002. Disponível em: < <http://www2.imm.dtu.dk/~aj/paper54.pdf> >. Acesso: dez/2007.

KLEIJER, F. Troposphere modeling and filtering from precise GPS leveling, **Publications on Geodesy**, no. 56, Netherland Geodetic Commission, Delft, 2004.

KLOBUCHAR, J. A. **Ionospheric effects on GPS**. GPS World, v.2, n.4, p. 48-50, Apr. 1991.

KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A.J.; XIAOQING, P. **An assessment of the current WAAS ionospheric correction algorithm in the south American region**. Journal of the Institute of Navigation, v.50, n.3, p. 193-218, Fall/2003.

KOUBA, J.; HÉROUX, P. GPS Precise Point Positioning using IGS Orbit Products. **GPS Solutions** , v. 5, n.2, 2000.

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

LANGLEY, R. B. Propagation on the GPS signals. In TEUNISSEN, P. J. G. e KLEUSBER, A. **GPS for Geodesy**. 2.ed: Springer Verlag, p. 111-149, 1996.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 3.ed. United States: John Wiley, 2004. 435p.

LYARD, F.; LEFEVRE, F.; LETELLIER, T.; FRANCIS, O. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. **Ocean Dynamics**. v. 56, p. 394-415, 2006.

MACHADO, W. C. **Solução rápida das ambigüidades GPS para aplicações no posicionamento relativo de bases curtas**. 2002. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MACMILLAN, S. IAGA V-MOD Geomagnetic Field Modeling: International Geomagnetic Reference Field IGRF-10. 2005. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>. Acesso: maio/2008.

MADER, G. L. A comparison of absolute and relative GPS antenna calibrations. **GPS Solutions**. John Wiley. v. 4, n. 4, p. 37-40. 2001.

MARQUES, F. A. **Influência da ionosfera no posicionamento GPS: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, n. 56/01, p. 14-27, jul. 2004.

MARINI, M. C. **Integração da rede GPS ITESP ao sistema geodésico brasileiro**. 2002. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

McCARTHY, D. D. **IERS Conventions (1996)**. IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS- Observatoire de Paris, 95p., 1996. Disponível em: <http://maia.usno.navy.mil/conventions.html>. Acesso: fev/2008.

McCARTHY D. D.; PETIT, G. **IERS Conventions (2003)**, IERS Technical Note 32, Central Bureau of IERS- Observatoire de Paris, 127p., 2004.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNESP, 2000. 287p.

MONICO, J. F. G. **Transformação entre referenciais celeste e terrestre de acordo com a resolução IAU 2000**. In: Claudia Pereira Krueger; Jorge Centeno. (Org.). Série em Ciências Geodésicas. 1 ed. Curitiba: Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas, v. 4, p. 31-41, 2004.

MONICO, J. F. G. **Ajustamento das observáveis GPS no contexto de posicionamento geodésico**. 2005. 275f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Fundamentos matemáticos envolvidos na realização do ITRS**. Curitiba: Boletim de Ciências Geodésicas, v. 12, nº 2, p. 337-351, 2006.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008. 476p.

MÜELLER, I. Spherical and practical astronomy as applied to Geodesy. Frederich Ungar: New York, 1997.

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

NIELL, A. E. Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. **Earth Planets Space**, v. 52, p. 699-702, 2000.

NIELL, A. E. The IMF Mapping functions. REV.2, **GPSMet Workshop**, Tsukuba, Japan. 2003. Disponível em: [http://www.haystack.mit.edu/geo/pubs/the\\_imf\\_mapping\\_functions\\_rev2.pdf](http://www.haystack.mit.edu/geo/pubs/the_imf_mapping_functions_rev2.pdf) . Acesso: nov/2007.

NIELL, A. E., PETROV, L. 2003. Using a Numerical Weather Model to Improve Geodesy. The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy (Proceedings), **European Center for Geophysics and Seismology**, Luxembourg, Belgium, 2-4 April, 2003. Disponível em: [http://www.haystack.mit.edu/geo/pubs/vert03apr\\_niell\\_final.pdf](http://www.haystack.mit.edu/geo/pubs/vert03apr_niell_final.pdf). Acesso: nov/2007.

ODIJK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays**. 2002. 242 f. Phd dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft.

OLIVEIRA FILHO, SARAIVA. **Precessão do eixo da Terra**. 2007. Disponível no endereço: <http://astro.if.ufrgs.br>. Acesso: mar/2007.

PEREZ, J. A. S. **Campo de Velocidade para as Estações da RBMC e do IGS Localizadas na Placa Sul Americana**: estimativa a partir do processamento de dados GPS. 2002. 166f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ROSA, G. S. P. **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**. 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ROTHACHER, M. **Towards a rigorous combination o space geodetic techniques**. IERS Technical Note, n. 30, 2002.

ROTHACHER, M. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. **GPS Solutions**, Vol. 4, No. 4, p. 55-60, 2001.

SAPUCCI, LF; MONICO, J. F. G. Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território Brasileiro utilizando GPS. In: **Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil**. Curitiba, 2001, v. 1,p. 47-61.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWW utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil**: sinergia entre Geodésia e Meteorologia. 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T. Variabilidade sazonal do atraso zenital troposférico sobre a América do Sul. **I Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**. Presidente Prudente. 24-27 de julho de 2007, p. 640-645.

SCHMID, R.; STEINGENBERGER, P.; ROTACHER, M.; GENDT, G.; GE, M.; TESMER, V. Absolute antenna phase center corrections and their impact on GPS results. **Geophysical Research Abstracts**, v. 8, p. 37-84, 2006.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**: foundations, methods, and applications. Berlin; New York: de Gruyter, 2003. 589p.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). 2009. Disponível em: <http://www.sirgas.org>. Acesso: mar/2009.

SOLER, T.; HOTHEM, L.D. **Coordinate Systems Used in Geodesy: Basic Definitions and Concepts**. In: Journal of Surveying Engineering, v.114, n.2, p.84-97,1988.

SOUZA, E. M. **Efeito de multicaminho de alta frequência no posicionamento relativo GPS estático**: detecção e atenuação utilizando wavelets. 2004. 141p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

STEINGENBERGER, P.; ROTHACHER, M.; DIETRICH, R.; FRITSCH, M.; RÜLKE, A.; VEY, S. **Reprocessing of a global GPS network**. Journal of Geophysical Research, vol. 111. 2006.

TEUNISSEN, P. J. G. Quality Control and GPS. In TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2 ed: Springer Verlag, p.271-318, 1998.

TORGE, W. **Geodesy**. Berlin: 3rd Edition, Walter de Gruyter, 2001. 416p.

VANÍČEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **GEODESY: The Concepts**. 2nd edition, Amsterdam, New York, Oxford, Tokio: Elsevier Science Publishers B.V., 1986. 297p.

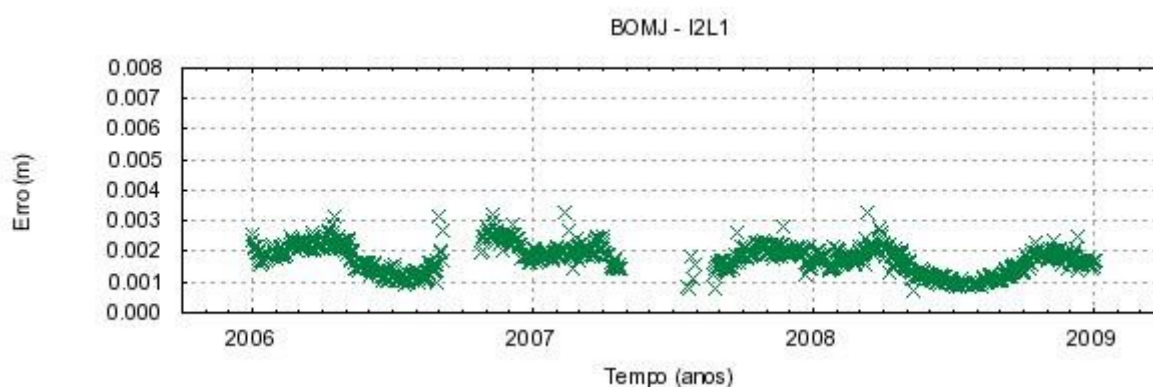
VEY, S.; DIETRICH, R.; FRITSCH, M.; RÜLKE, A. Influence of mapping function parameters on global GPS network analyses: comparisons between NMF and IMF. **Geophysical Research Letters**, vol. 33. 2006.

WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M.; MENGE, F.; BÖDER, V.; SEEBER, G. Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real Time. **Proceedings of ION GPS 2000**, 2000.

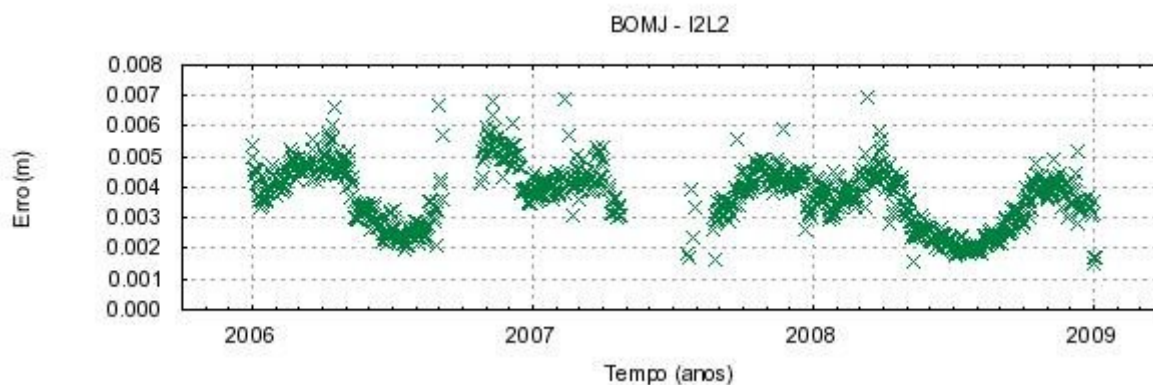
WITCHAYANGKOON, B. **Elements of GPS Precise Point Positioning**. 2000. 265f. Thesis Doctor of Philosophy in Spatial Information Science and Engineering. University of Maine.

## APÊNDICE A – Séries temporais da variação média diária dos efeitos de 2ª e 3º nas observáveis GPS

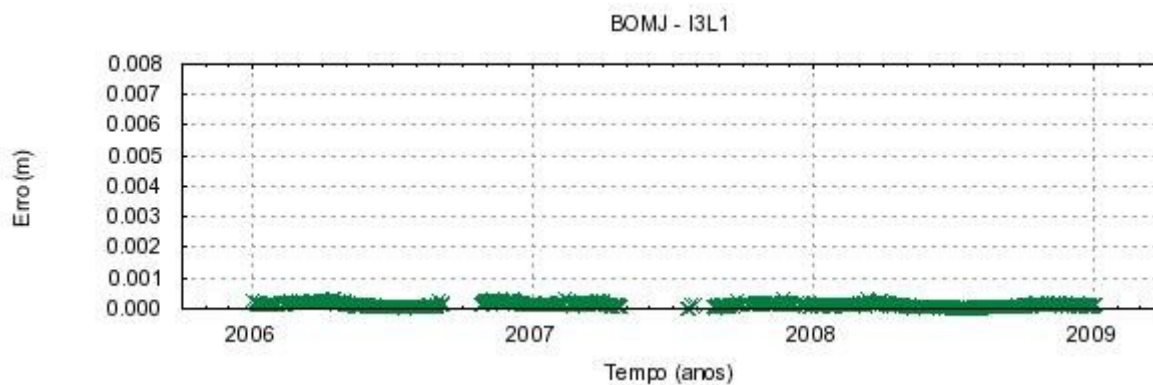
Neste Apêndice são apresentadas as séries temporais obtidas com base nas correções aplicadas com o software RINEX\_HO, que descrevem o comportamento anual dos efeitos de 2ª e 3ª ordem nas portadoras L1 e L2, para um período de três anos de dados (2006 a 2008) das estações BOMJ, CUIB, ILHA, IMPZ, LINS, NAUS, OURI, ROSA, SJRP e VICO:



**Figura A.1** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação BOMJ.

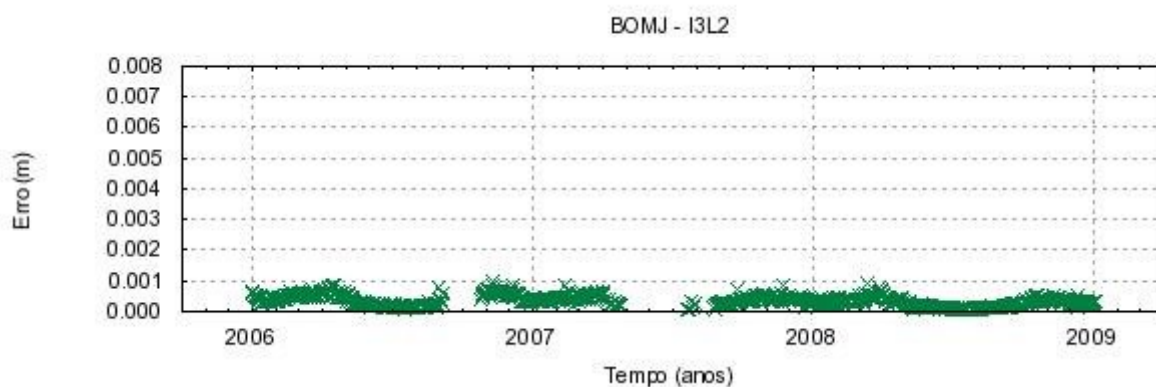


**Figura A.2** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação BOMJ.

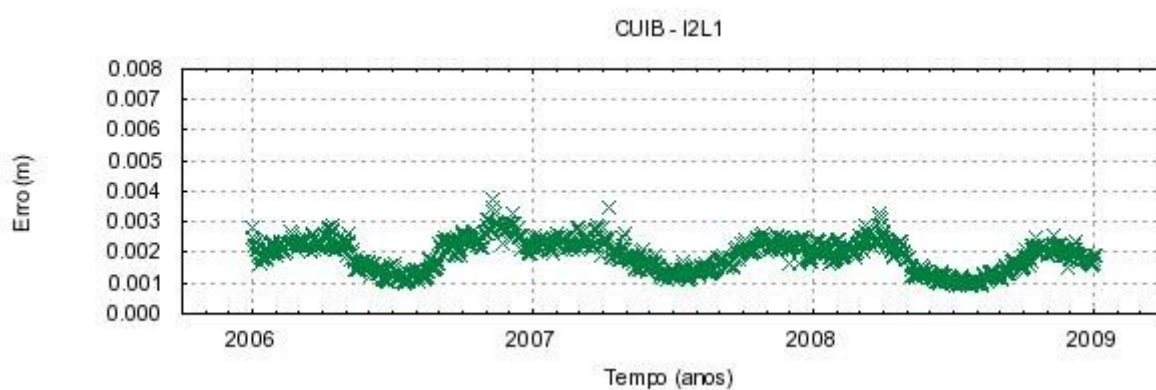


**Figura A.3** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação BOMJ.

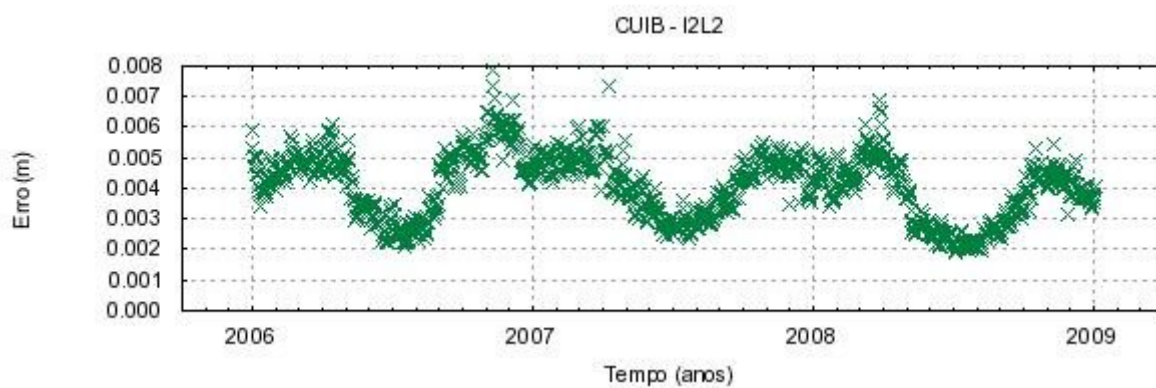




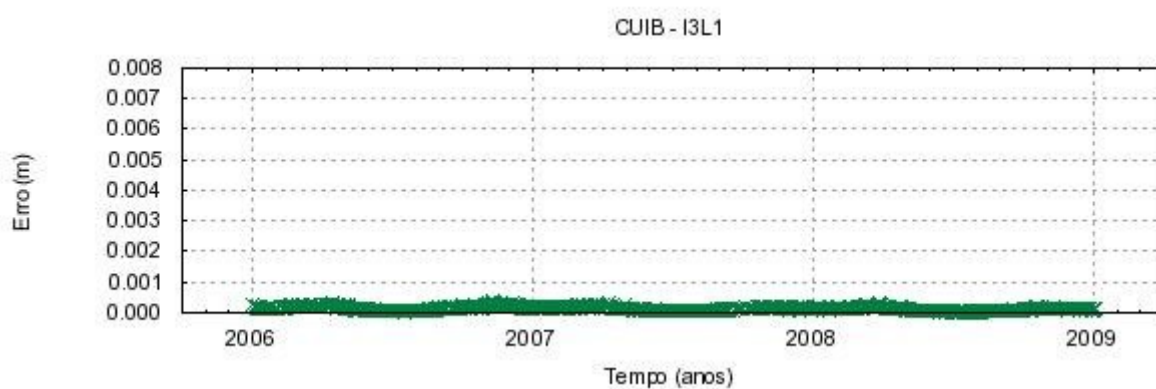
**Figura A.4** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação BOMJ.



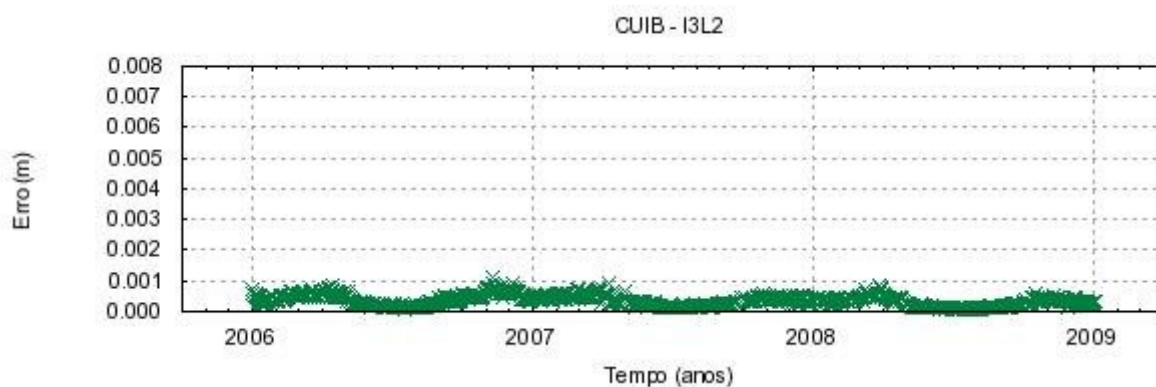
**Figura A.5** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação CUIB.



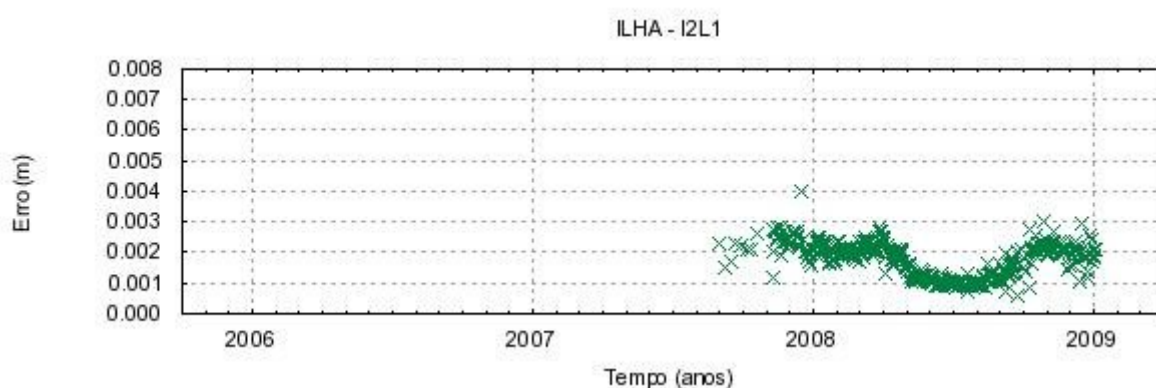
**Figura A.6** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação CUIB.



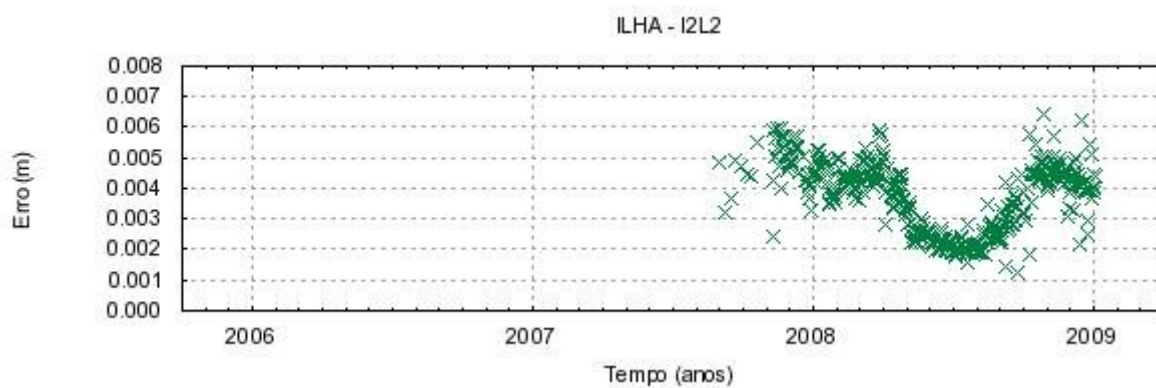
**Figura A.7** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação CUIB.



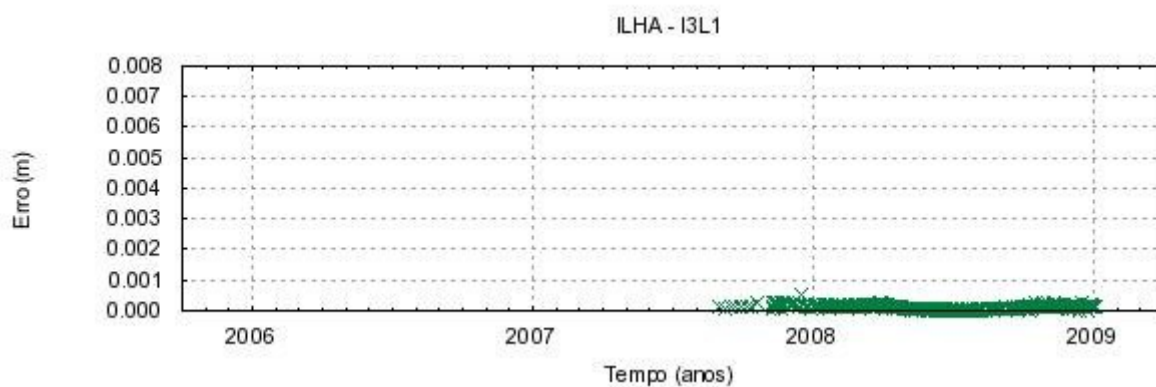
**Figura A.8** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação CUIB.



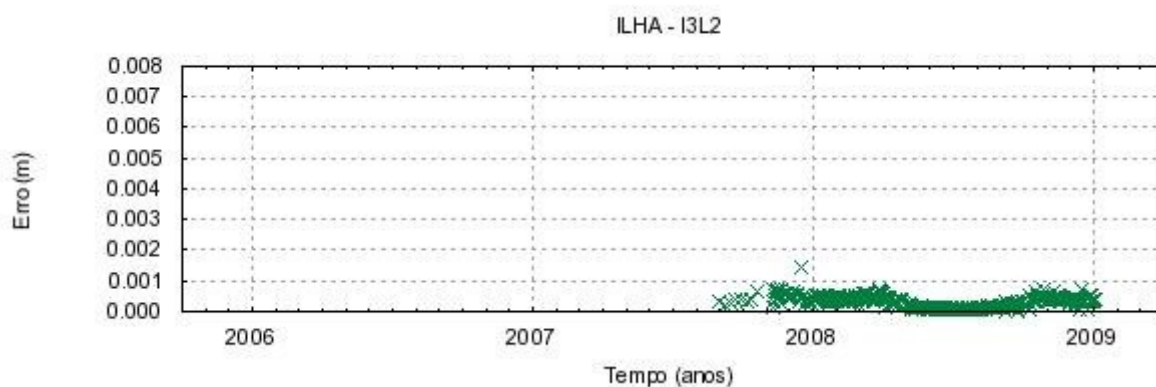
**Figura A.9** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação ILHA.



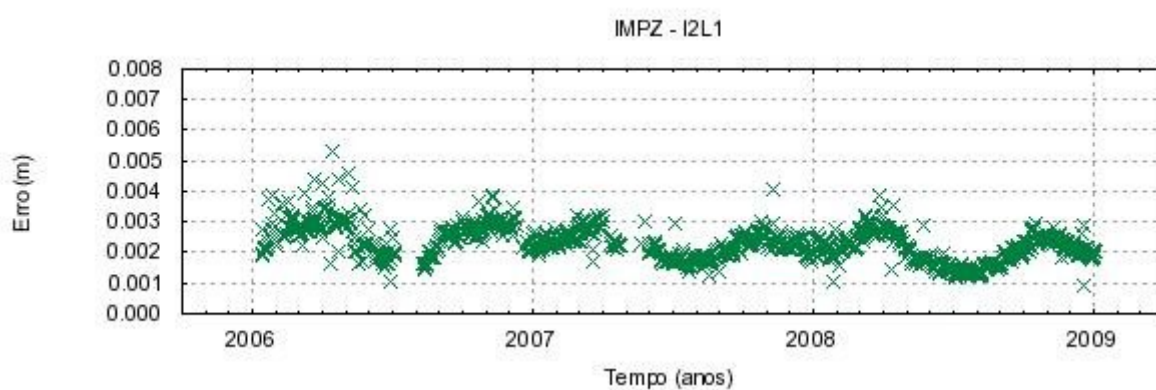
**Figura A.10** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação ILHA.



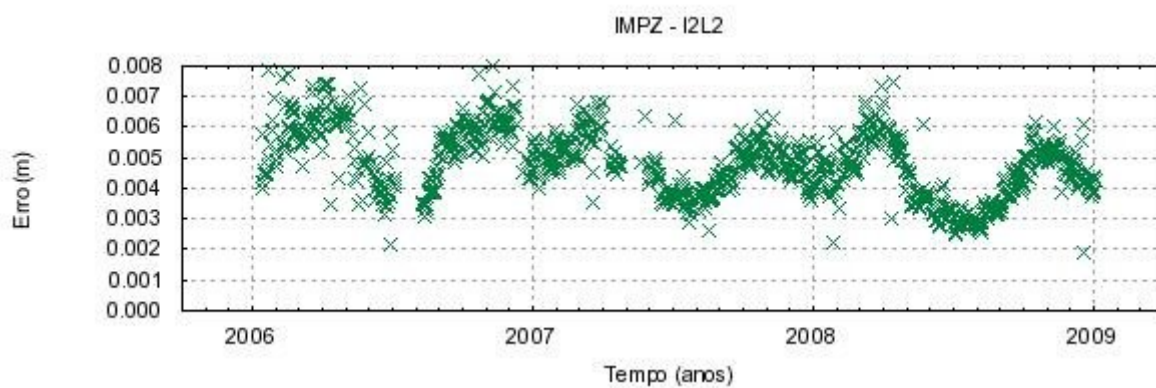
**Figura A.11** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação ILHA.



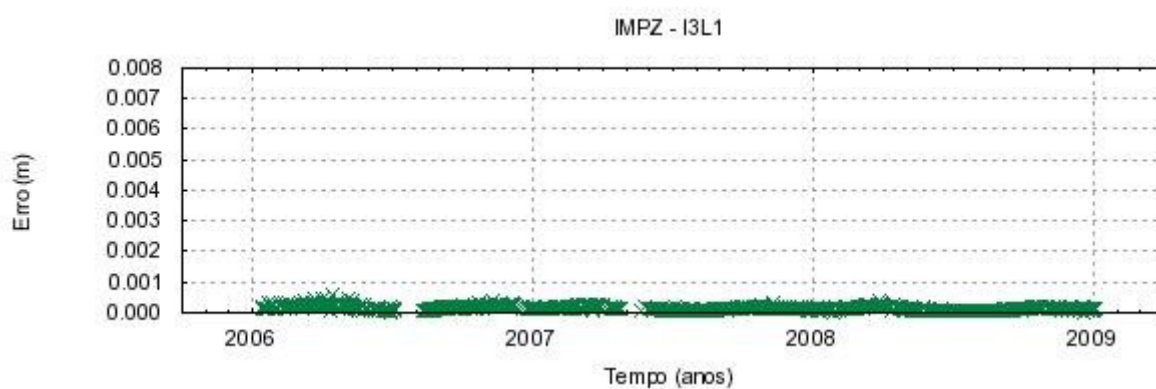
**Figura A.12** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação ILHA.



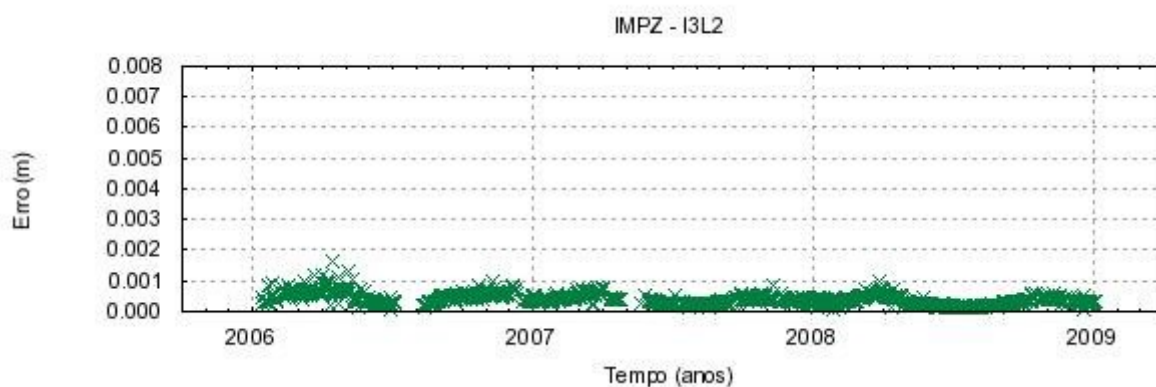
**Figura A.13** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação IMPZ.



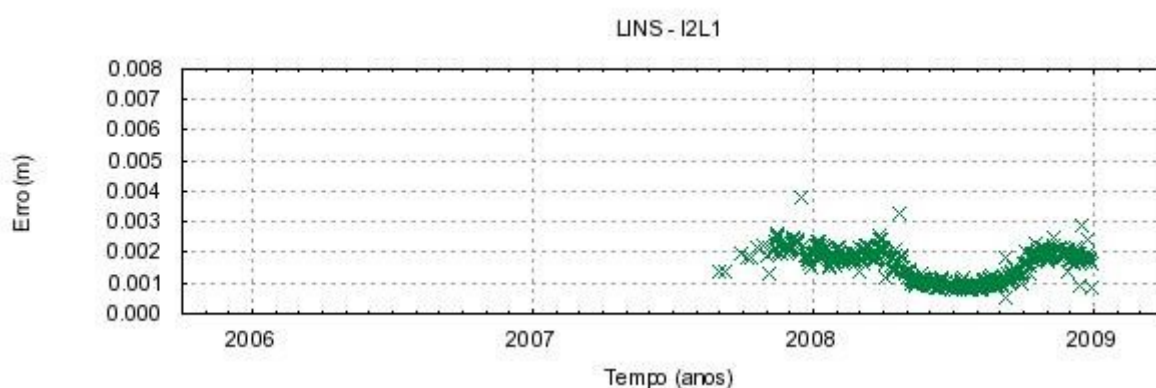
**Figura A.14** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação IMPZ.



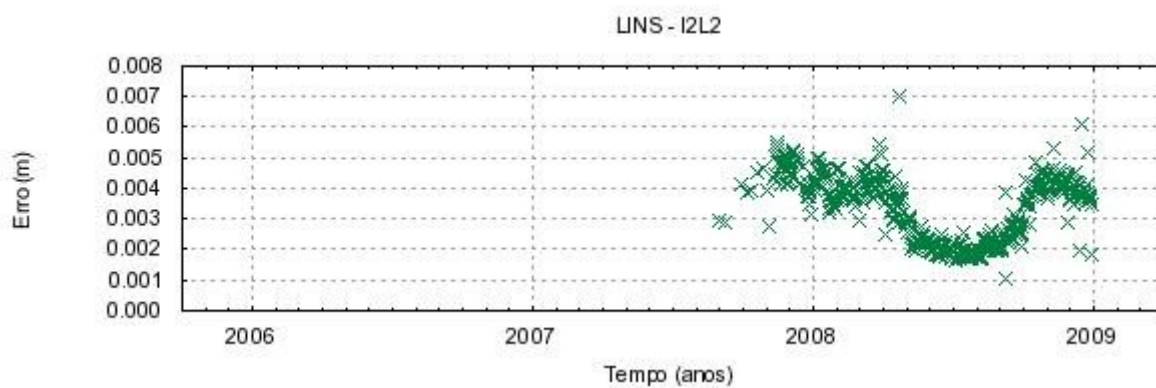
**Figura A.15** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação IMPZ.



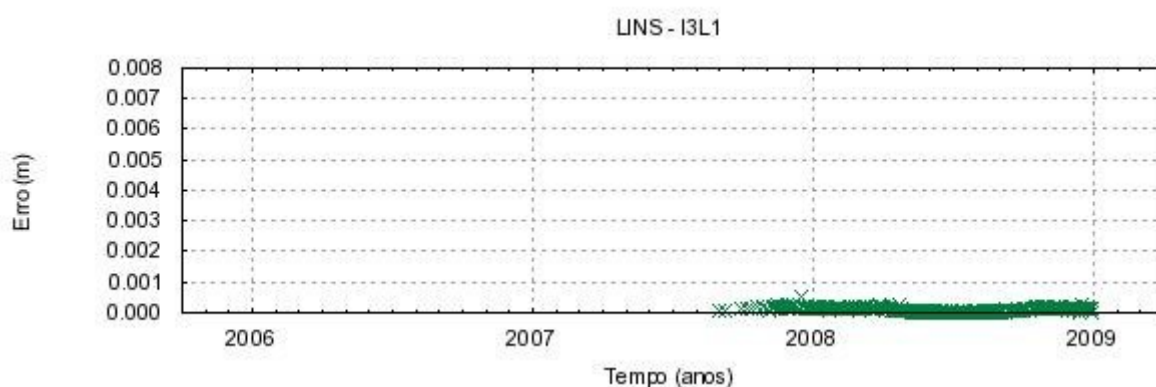
**Figura A.16** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação IMPZ.



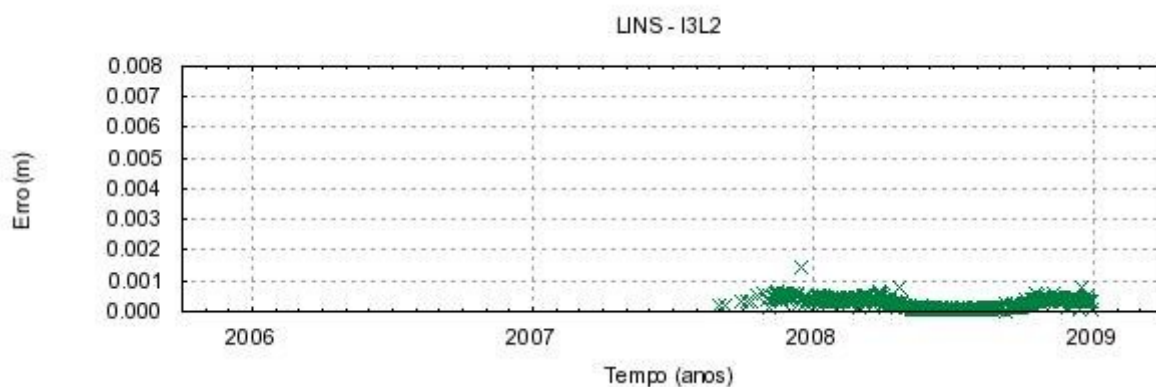
**Figura A.17** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação LINS.



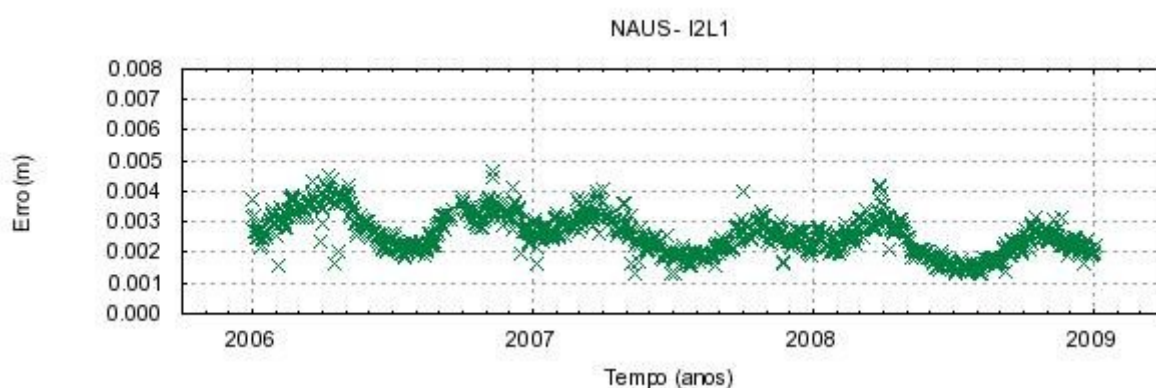
**Figura A.18** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação LINS.



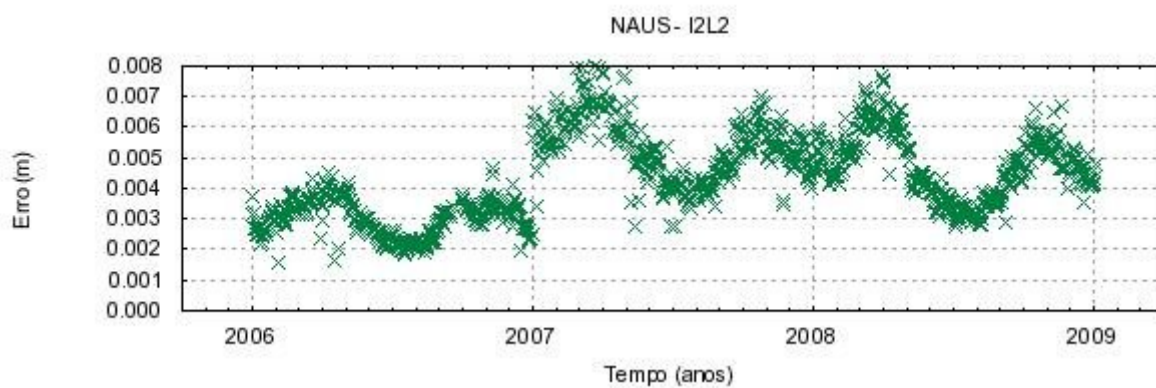
**Figura A.19** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação LINS.



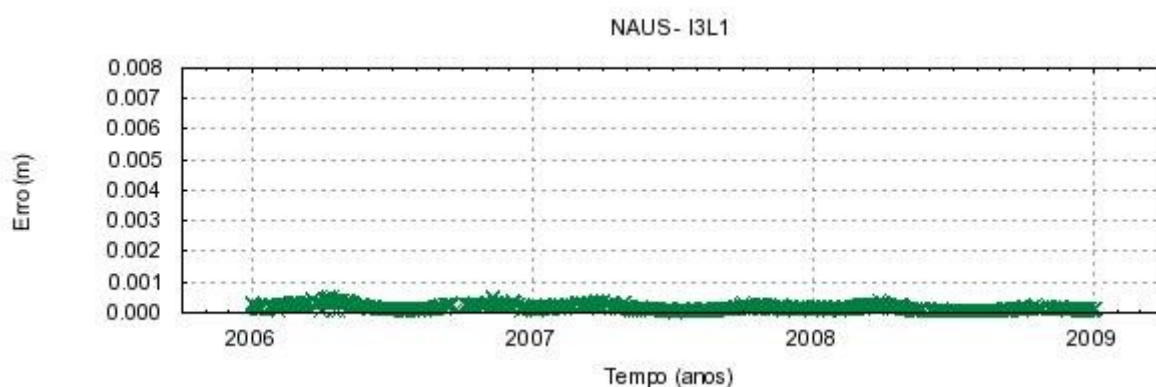
**Figura A.20** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação LINS.



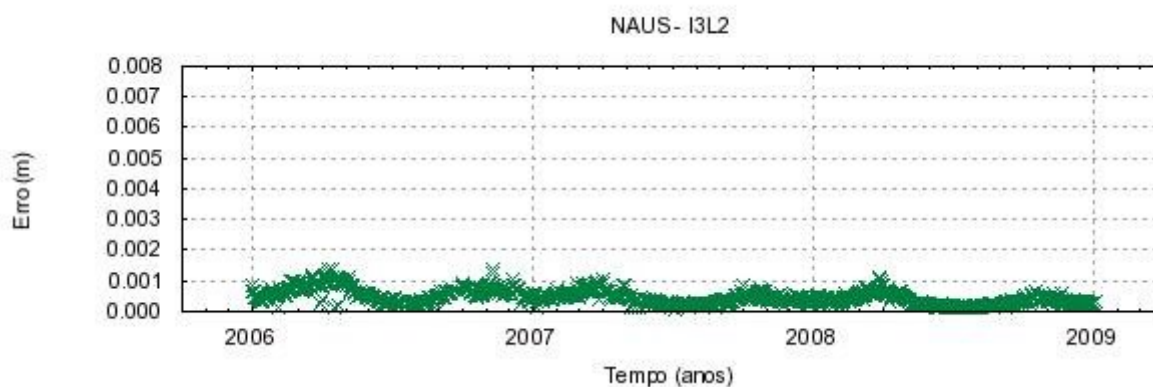
**Figura A.21** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação NAUS.



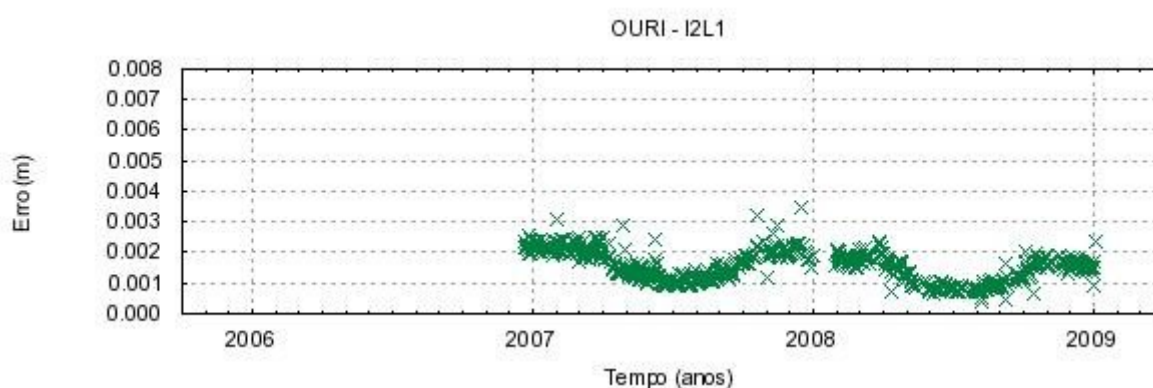
**Figura A.22** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação NAUS.



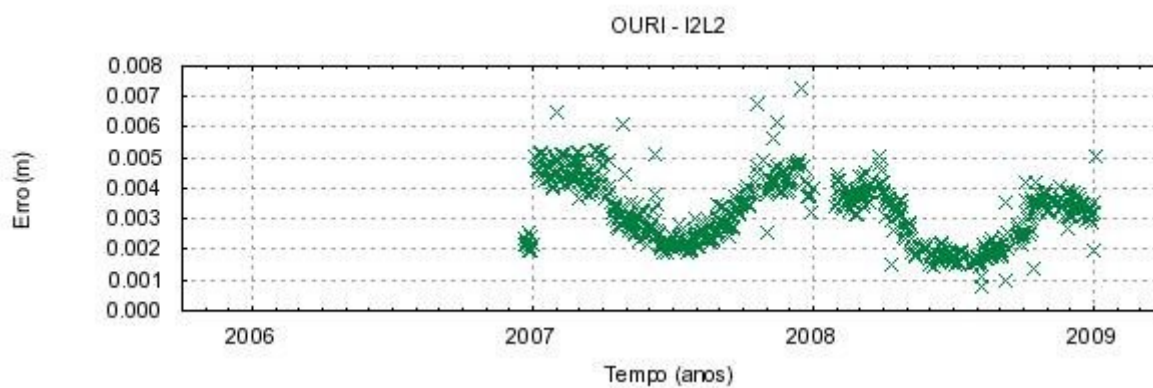
**Figura A.23** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação NAUS.



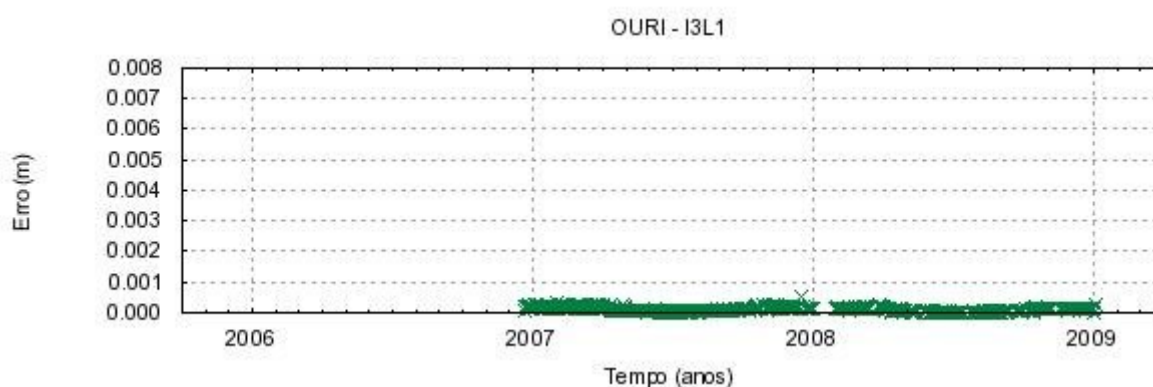
**Figura A.24** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação NAUS.



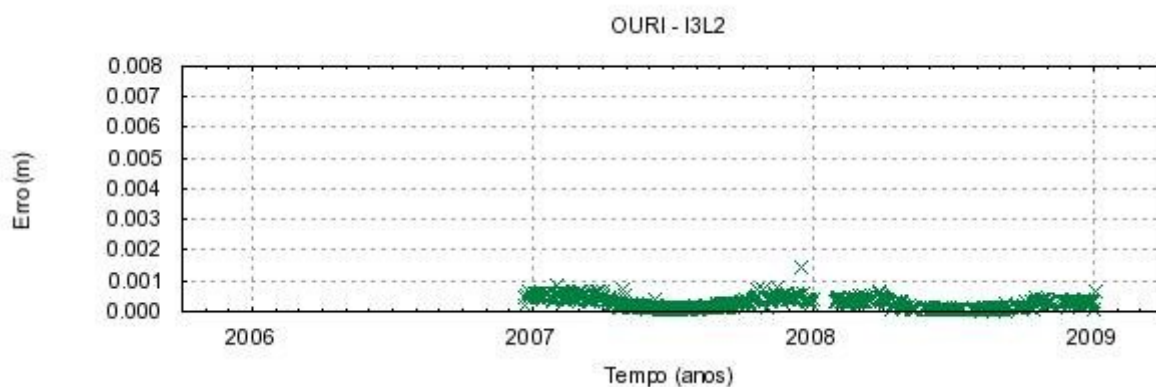
**Figura A.25** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação OURI.



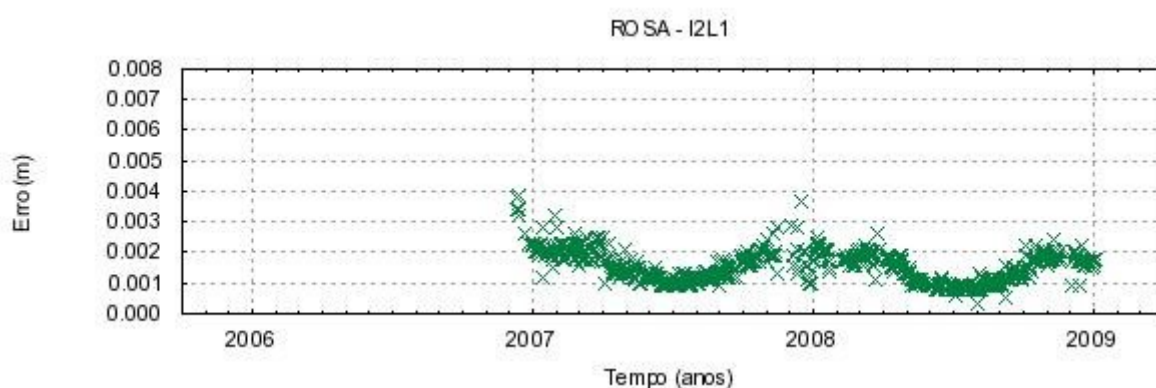
**Figura A.26** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação OURI.



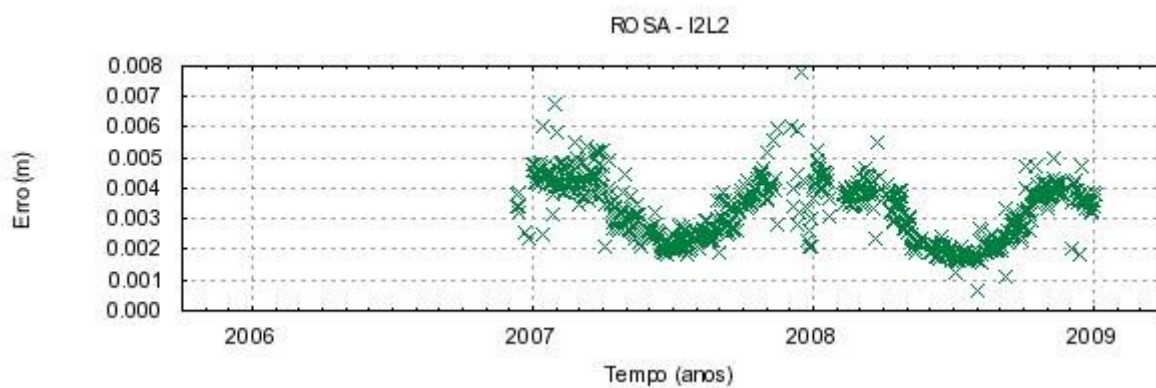
**Figura A.27** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação OURI.



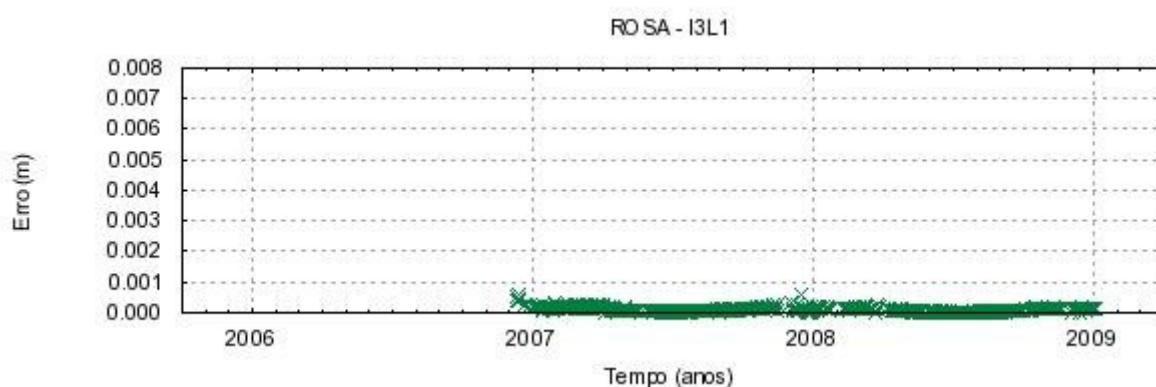
**Figura A.28** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação OURI.



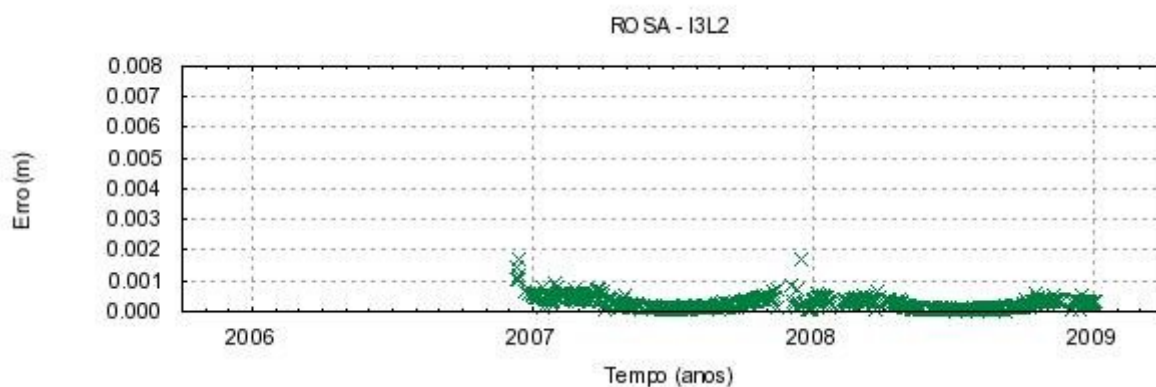
**Figura A.29** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação ROSA.



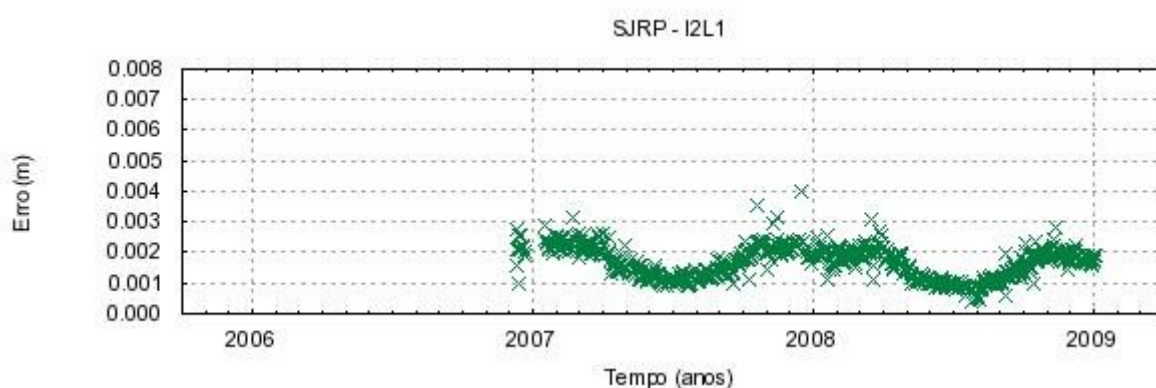
**Figura A.30** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação ROSA.



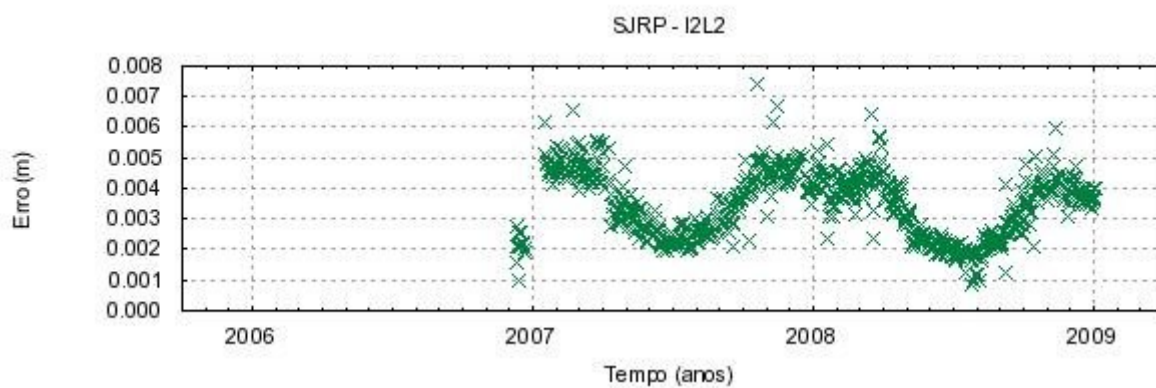
**Figura A.31** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação ROSA.



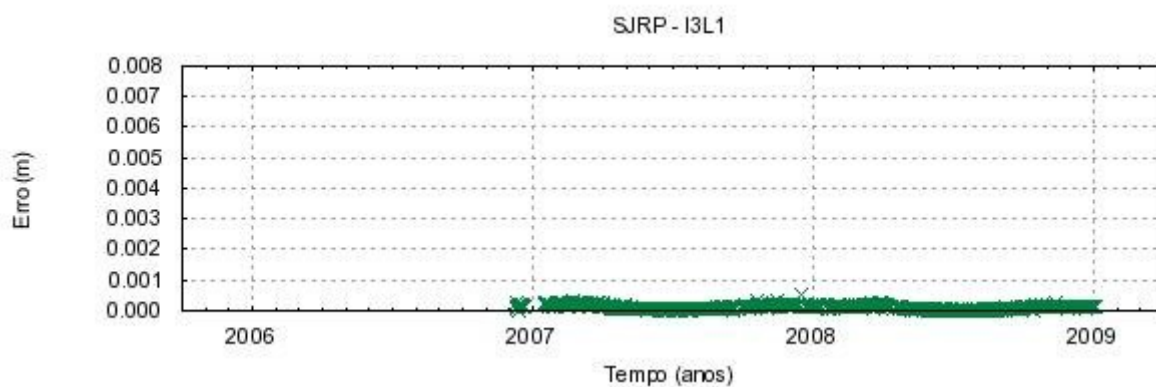
**Figura A.32** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação ROSA.



**Figura A.33** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação SJRP.

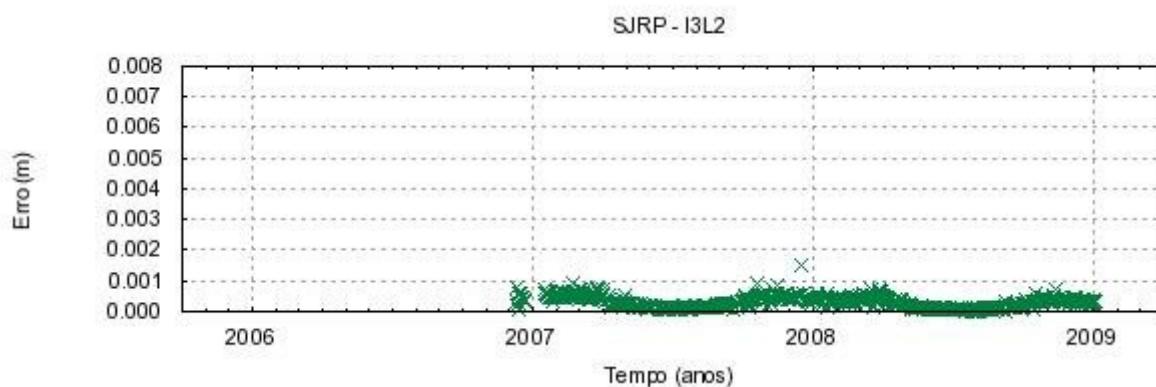


**Figura A.34** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação SJRP.

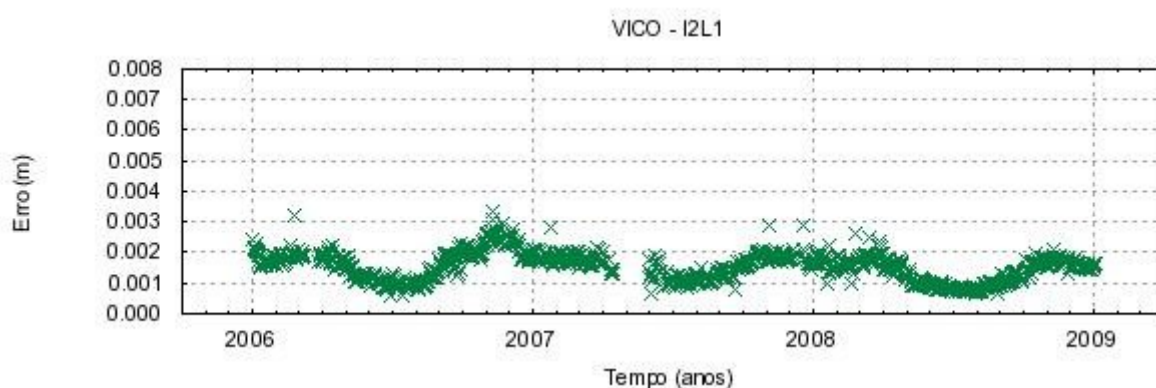


**Figura A.35** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação SJRP.

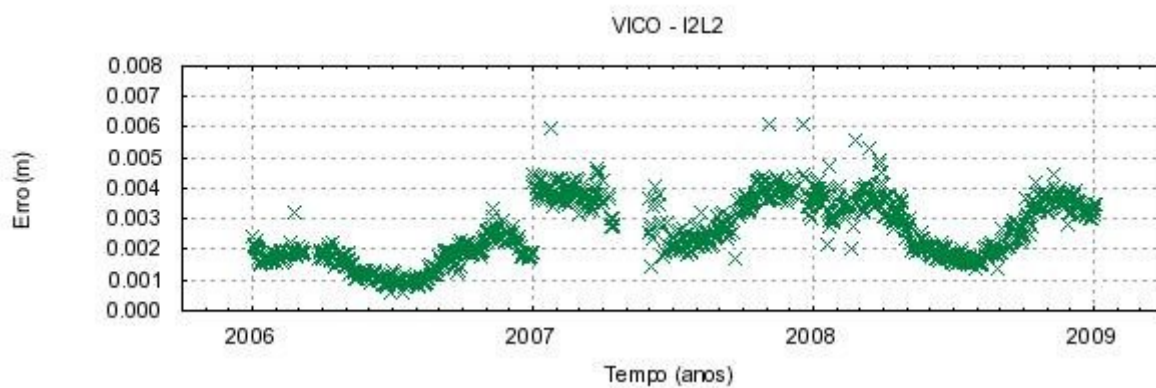




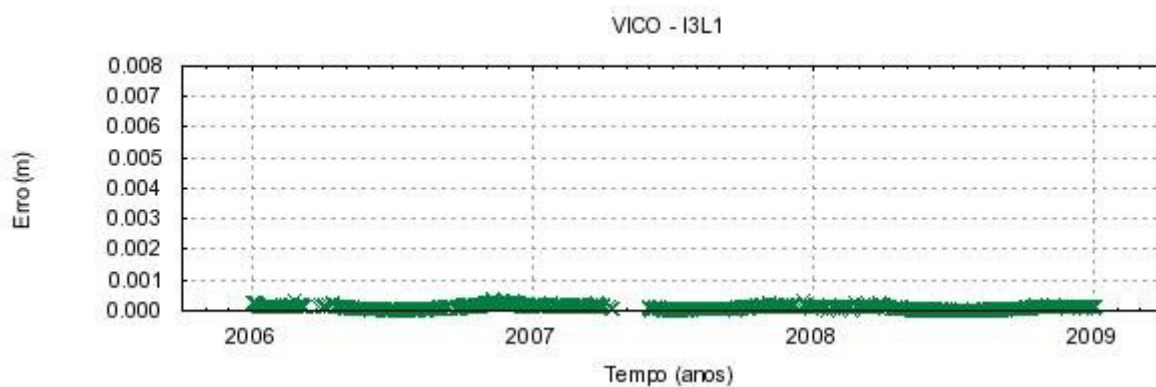
**Figura A.36** - Efeito de 3ª ordem na portadora L2 para a estação SJRP.



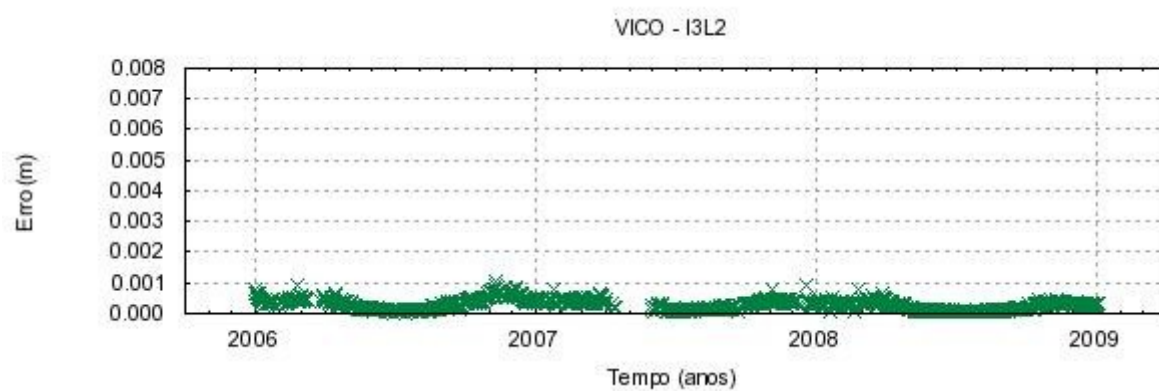
**Figura A.37** - Efeito de 2ª ordem na portadora L1 para a estação VICO.



**Figura A.38** - Efeito de 2ª ordem na portadora L2 para a estação VICO.



**Figura A.39** - Efeito de 3ª ordem na portadora L1 para a estação VICO.



**Figura A.40** - Efeito de 3<sup>a</sup> ordem na portadora L2 para a estação VICO.

**APÊNDICE B – Coordenadas das estações SIRGAS processadas no período de 2006 a 2008 na época de referência 2007,507.**

<b>Coordenadas SIRGAS (2007,507)</b>				
<b>Nº</b>	<b>Estação</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Z (m)</b>
1	AREQ	1942826,205	-5804070,332	-1796894,252
2	BELE	4228139,026	-4772752,101	-155761,2783
3	BOGA	1744517,335	-6116051,456	512580,9393
4	BOGT	1744398,997	-6116037,401	512731,7506
5	BOMJ	4510195,823	-4268322,353	-1453035,198
6	BRAZ	4115014,077	-4550641,578	-1741443,928
7	BRFT	4985393,528	-3954993,428	-428426,6737
8	BRMU	2304703,445	-4874817,181	3395186,968
9	BUCA	1838191,295	-6057527,671	785312,2346
10	BUEN	1430383,859	-6200818,167	428934,0041
11	CALI	1483099,942	-6193060,189	373124,0799
12	CAM2	-56581,3535	-6001449,571	2151509,152
13	CHET	179584,7608	-6048080,667	2010447,351
14	CHIH	-1552307,824	-5382771,959	3041779,774
15	CHPI	4164613,883	-4162456,896	-2445028,777
16	COL2	-1427005,635	-5852976,043	2089088,956
17	CONZ	1492007,667	-4887910,725	-3803639,894
18	CORD	2345503,868	-4910842,849	-3316365,299
19	CRAT	4888826,026	-4017957,458	-798308,9193
20	CRO1	2607771,237	-5488076,676	1932767,818
21	CUIB	3430711,393	-5099641,594	-1699432,843
22	CULI	-1730936,732	-5528855,258	2658865,608
23	ETCG	645208,2686	-6249842,186	1100399,469
24	FORT	4985386,57	-3954998,613	-428426,3192
25	GLPS	-33801,5284	-6377516,528	-82154,3655
26	GUAT	-56063,5681	-6174978,671	1596665,273
27	GVAL	4490200,799	-4036984,964	-2048288,306
28	HER2	-1996003,988	-5208674,517	3082959,56
29	IGM1	2751804,043	-4479879,312	-3598922,499
30	KOUR	3839591,369	-5059567,559	579957,0724
31	LPGS	2780103,005	-4437418,942	-3629404,492
32	MANA	407981,8529	-6222925,704	1333528,978
33	MARA	1976117,174	-5948895,142	1173592,258
34	MCLA	4404519,585	-4235798,424	-1823409,082
35	MEDE	1579608,436	-6142783,844	684352,3216
36	MERI	39480,7643	-5957733,177	2269335,148
37	MEXI	-2312590,955	-4853743,628	3419740,481
38	MTY2	-1029483,481	-5657637,232	2750926,104
39	MZAC	1932262,706	-5001226,536	-3444667,822
40	NEIA	3875254,986	-4292588,739	-2681108,691
41	NEVA	1617259,969	-6161575,148	324674,6856
42	OAX2	-713483,0451	-6058316,086	1861594,697
43	OHI2	1525811,917	-2432478,225	-5676165,588
44	PALM	1192671,95	-2450887,629	-5747096,032
45	PARA	3763751,666	-4365113,848	-2724404,617

46	PERA	1571418,681	-6160208,416	529446,4358
47	POAL	3467519,414	-4300378,57	-3177517,651
48	PSTO	1404951,739	-6222655,093	134028,6243
49	PUR3	2358177,937	-5573619,654	2007083,985
50	RECF	5176588,62	-3618162,165	-887363,8227
51	RIOD	4280294,881	-4034431,26	-2458141,292
52	RIOG	1429907,815	-3495354,85	-5122698,636
53	RIOH	1841101,025	-5973351,337	1264686,57
54	RWSN	1956973,434	-4217335,326	-4351745,472
55	SALV	4863495,723	-3870312,376	-1426347,725
56	SANT	1769693,576	-5044574,177	-3468320,91
57	SCUB	1474538,078	-5811243,272	2168958,83
58	SMAR	3280748,415	-4468909,778	-3143408,609
59	TAMP	-807922,6585	-5849358,252	2402967,673
60	TOL2	-1009229,178	-5939511,429	2094889,223
61	TUNA	1818373,168	-6085596,91	610965,0156
62	UBAT	4129567,695	-4146742,97	-2527616,41
63	UBER	4014997,22	-4509022,456	-2052040,617
64	UNRO	2627448,198	-4668383,192	-3450213,476
65	UNSA	2412830,455	-5271936,76	-2652209,023
66	VALL	1807579,744	-6006678,336	1151876,819
67	VARG	4165518,28	-4229235,807	-2327739,564
68	VBCA	2319240,823	-4411743,951	-3966484,098
69	VESL	2009329,817	-99741,4825	-6033158,432
70	VICO	4373283,312	-4059639,079	-2246959,638
71	VIL2	-310300,6565	-6060324,013	1957383,602
72	YOPA	1921562,408	-6053497,548	587652,0869
73	ILHA	3735306,346	-4669666,418	-2212269,395
74	LINS	3833248,661	-4525428,523	-2340158,405
75	OURI	3785720,224	-4494897,668	-2471710,505
76	ROSA	3551520,495	-4704836,153	-2428155,641
77	SJRP	3885706,909	-4527123,989	-2249400,053
78	PPTE	3687624,363	-4620818,703	-2386880,285
79	IMPZ	4289656,424	-4680884,961	-606347,2372
80	NAUS	3179409,365	-5519130,679	-334110,0756
81	ALAR	1942826,183	-5804070,33	-1796894,284
82	APTO	1460797,831	-6147200,814	868399,4629
83	ARCA	4115014,052	-4550641,553	-1741443,958
84	AUTF	1360918,889	-3420457,927	-5191175,199
85	AZUE	1430383,827	-6200818,153	428933,9535
86	AZUL	1483099,912	-6193060,172	373124,0304
87	BDOS	3143382,229	-5359714,801	1434875,821
88	BERR	1703223,687	-6104502,327	716436,9285
89	BOAV	3117452,212	-5555487,851	314480,8346
90	BQLA	1636421,523	-6043722,351	1211155,186
91	CBSB	1060277,17	-5912339,392	2137708,386
92	CEEU	2751804,016	-4479879,283	-3598922,514
93	CEFE	4562488,492	-3871935,82	-2200001,485
94	CFAG	2016584,892	-5050165,649	-3323308,739

95	CIC1	-2433177,176	-4845044,819	3348295,913
96	COPO	1907040,798	-5337379,024	-2916334,797
97	CRCS	2459721,859	-5770508,881	1155112,056
98	CUCU	1901228,71	-6025504,297	870700,4996
99	CUEC	3763751,633	-4365113,822	-2724404,642
100	CULC	-1733739,003	-5528108,586	2658500,537
101	DAVI	5176588,612	-3618162,16	-887363,8605
102	EXU0	1427635,067	-5672506,906	2534091,7
103	FLOR	1585141,092	-6175731,454	179144,865
104	FQNE	1779063,782	-6097672,887	603896,7108
105	GCGT	902661,6563	-5954125,669	2093986,013
106	GOJA	-1009229,189	-5939511,423	2094889,194
107	GOLD	-2353614,364	-4641385,318	3676976,425
108	GRE0	2961421,048	-5486288,76	1341394,355
109	GYEC	2319240,804	-4411743,933	-3966484,117
110	IGN1	1921562,385	-6053497,532	587652,036
111	IMBT	3714771,548	-4221851,118	-2999473,852
112	INEG	-1260435,685	-5788547,185	2360340,045
113	IQQE	3885706,907	-4527123,961	-2249400,148
114	ISPA	-1881703,501	-5359979,782	-2890599,261
115	LHCL	2079355,62	-4582903,483	-3905925,654
116	LPAZ	-2022283,436	-5461274,181	2592317,131
117	MABA	4156055,646	-4801656,535	-592100,5658
118	MAPA	4005461,135	-4963550,325	5162,3276
119	MDO1	-1329998,807	-5328393,37	3236504,146
120	MECO	2946968,572	-4730056,988	-3091864,996
121	MGIN	2459721,871	-5770508,902	1155112,073
122	MGMC	1901228,721	-6025504,308	870700,521
123	MGUB	1215704,337	-6255712,211	-318818,9637
124	MSCG	1585141,095	-6175731,47	179144,8793
125	MTBA	1779063,79	-6097672,89	603896,7312
126	MTSF	902661,6525	-5954125,678	2093986,016
127	MZAE	2961421,073	-5486288,763	1341394,374
128	MZAS	1940230,185	-4884145,406	-3603203,673
129	NAS0	1255070,797	-5643661,88	2684338,98
130	ONRJ	4283638,362	-4026028,858	-2466096,75
131	PARC	1255992,461	-3622975,144	-5079719,249
132	PBCG	4076879,964	-4270390,983	-2407418,027
133	PEPE	4019130,626	-4504012,609	-2055168,697
134	PIE1	-1640916,941	-5014781,201	3575447,087
135	PMB1	3626394,172	-5206998,177	643353,1415
136	POLI	4010099,516	-4259927,343	-2533538,713
137	POPA	1477067,447	-6200659,108	270141,3093
138	POVE	2774265,615	-5662060,145	-959415,8986
139	PTEC	4785329,95	-4087942,532	-1033193,897
140	RIO2	1429907,808	-3495354,836	-5122698,626
141	RIOB	2373576,785	-5817088,39	-1096515,676
142	RIOP	1255144,967	-6253609,45	-182569,8232
143	RJCG	4450354,263	-3913332,843	-2350256,277
144	ROGM	2615472,446	-5694455,945	-1185599,824

145	ROJI	2945010,578	-5529377,061	-1194259,217
146	S061	1272867,336	-6252772,126	-23801,7413
147	SAGA	2486243,764	-5873685,339	-15906,7312
148	SALU	4566947,897	-4443098,518	-286674,7128
149	SAMA	1704996,199	-6020152,332	1233459,219
150	SAVO	4870283,749	-3864605,303	-1418872,531
151	SCCH	3623419,993	-5214015,484	602359,2372
152	SCLA	4863840,332	-3871158,66	-1422726,679
153	SRLP	2371430,063	-4904120,007	-3307377,413
154	SRNW	3455962,491	-5320074,898	656216,0653
155	SRZN	3623419,985	-5214015,455	602359,2202
156	SSA1	4863840,315	-3871158,629	-1422726,696
157	SSIA	95567,0129	-6197785,584	1500590,552
158	TOGU	3144469,672	-4258022,126	-3546571,935
159	TOPL	1687310,403	-5079964,551	-3456509,264
160	TUCU	2386117,191	-5171223,307	-2862949,095
161	UCOR	2371430,047	-4904119,991	-3307377,437
162	UFPR	3763751,67	-4365113,854	-2724404,626
163	UGTO	-1164730,152	-5843944,678	2272414,231
164	UNSJ	1987485,038	-5065493,356	-3317557,479
165	USLP	1883105,459	-6035606,255	-839206,321
166	UYMO	2909133,005	-4355451,299	-3627801,189
167	UYRO	1679425,154	-6123536,896	602182,138
168	UYTA	14103,85	-6103995,012	1843981,737
169	VALP	1088671	-5596851	2848798
170	VIVI	1798110,734	-6103160,676	450209,602
171	AMHU	4228139,004	-4772752,095	-155761,3243
172	ANDS	898664,0214	-6160668,063	1380782,87
173	ANTC	1608539,611	-4816369,724	-3847798,522
174	ASC1	6118526,056	-1572344,753	-876451,0458
175	BANS	2132376,359	-5935471,324	948857,2518
176	CART	1567348,626	-6075293,506	1142850,835
177	CRUZ	1883105,448	-6035606,272	-839206,2289
178	CUM3	2358177,887	-5573619,634	2007083,923
179	DORA	1679425,225	-6123536,868	602182,2749
180	ELEN	14103,7637	-6103995,03	1843981,742
181	GTK0	1919596,643	-5620954,242	2316053,946
182	GUAV	1807579,708	-6006678,325	1151876,768
183	IBAG	1623166,637	-6149837,646	489244,1992
184	JAMA	1388059,85	-5909149,034	1951963,888
185	KYW1	842464,4082	-5741929,018	2637061,522
186	MANZ	-1489330,93	-5843667,779	2070027,868
187	MIA3	982510,285	-5664647,17	2752419,648
188	MOTE	1539876,935	-6112744,606	968435,2816
189	MPLA	2700316,844	-4243736,744	-3908569,72
190	PDES	1753203,668	-3922031,144	-4698513,502
191	QUIB	3626394,16	-5206998,178	643353,1538
192	SMRT	2743826,208	-5410452,473	1962822,983
193	TUMA	1245830,022	-6252040,186	201464,1402

**APÊNDICE C – Solução SIR09P01 na época de referência 2007,507.**

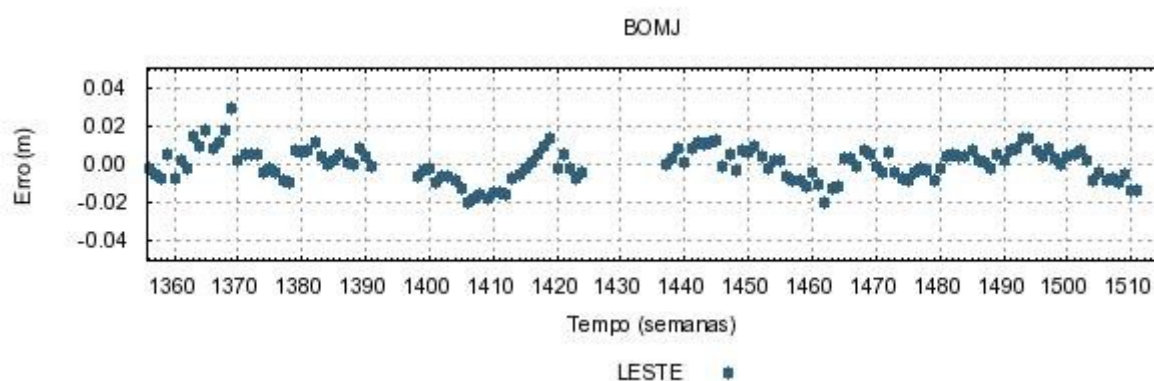
<b>Coordenadas SIRGAS atualizadas para época 2007,507</b>				
<b>Nº</b>	<b>Estação</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Z (m)</b>
1	AREQ	1942826,188	-5804070,306	-1796894,268
2	BANS	2132376,364	-5935471,333	948857,228
3	BDOS	3143382,237	-5359714,824	1434875,782
4	BELE	4228139,034	-4772752,094	-155761,3126
5	BOGA	1744517,338	-6116051,609	512580,8926
6	BOGT	1744399,001	-6116037,54	512731,719
7	BOMJ	4510195,828	-4268322,34	-1453035,232
8	BRAZ	4115014,082	-4550641,566	-1741443,961
9	BRFT	4985393,536	-3954993,423	-428426,7034
10	BRMU	2304703,448	-4874817,188	3395186,952
11	BUCA	1838191,299	-6057527,682	785312,198
12	BUEN	1430383,862	-6200818,181	428933,9699
13	CALI	1483099,945	-6193060,198	373124,0429
14	CART	1567348,628	-6075293,529	1142850,81
15	CFAG	2016584,896	-5050165,639	-3323308,768
16	CHET	179584,7621	-6048080,686	2010447,356
17	CHIH	-1552307,825	-5382771,962	3041779,791
18	CHPI	4164613,888	-4162456,881	-2445028,807
19	COL2	-1427005,635	-5852976,042	2089088,962
20	CONZ	1492007,67	-4887910,726	-3803639,942
21	COPO	1907040,802	-5337379,03	-2916334,843
22	CRAT	4888826,041	-4017957,454	-798308,9492
23	CRCS	2459721,863	-5770508,891	1155112,03
24	CRO1	2607771,239	-5488076,708	1932767,788
25	CUCU	1901228,713	-6025504,31	870700,4649
26	CUIB	3430711,399	-5099641,581	-1699432,874
27	DORA	1679425,227	-6123536,884	602182,2368
28	ETCG	645208,2706	-6249842,216	1100399,427
29	FLOR	1585141,094	-6175731,454	179144,8429
30	GLPS	-33801,52749	-6377516,529	-82154,3922
31	GUAT	-56063,56946	-6174978,691	1596665,268
32	GVAL	4490200,804	-4036984,948	-2048288,338
33	HER2	-1996003,99	-5208674,523	3082959,578
34	IMPZ	4289656,427	-4680884,95	-606347,2685
35	INEG	-1260435,685	-5788547,276	2360340,092
36	KOUR	3839591,386	-5059567,569	579957,0401
37	LHCL	2079355,623	-4582903,463	-3905925,673
38	LPAZ	-2022283,438	-5461274,252	2592317,088
39	LPGS	2780103,009	-4437418,923	-3629404,517
40	MANA	407981,8537	-6222925,732	1333528,967
41	MAPA	4005461,141	-4963550,309	5162,2945
42	MARA	1976117,171	-5948895,161	1173592,227
43	MCLA	4404519,59	-4235798,413	-1823409,112
44	MECO	2946968,574	-4730056,97	-3091865,02
45	MEDE	1579608,44	-6142783,845	684352,2935
46	MERI	39480,76444	-5957733,113	2269335,124
47	MEXI	-2312590,957	-4853743,665	3419740,447
48	MOTE	1539876,938	-6112744,638	968435,2629

49	MPLA	2700316,846	-4243736,721	-3908569,744
50	MTY2	-1029483,481	-5657637,238	2750926,115
51	MZAC	1932262,709	-5001226,527	-3444667,851
52	NAUS	3179409,369	-5519130,655	-334110,1063
53	NEIA	3875254,992	-4292588,718	-2681108,718
54	NEVA	1617259,972	-6161575,157	324674,6495
55	OAX2	-713483,0442	-6058316,093	1861594,695
56	OH12	1525811,918	-2432478,221	-5676165,595
57	ONRJ	4283638,365	-4026028,839	-2466096,776
58	PALM	1192671,952	-2450887,61	-5747096,028
59	PARC	1255992,464	-3622975,126	-5079719,273
60	PERA	1571418,683	-6160208,43	529446,3956
61	POAL	3467519,421	-4300378,555	-3177517,68
62	POPA	1477067,45	-6200659,119	270141,278
63	POVE	2774265,619	-5662060,112	-959415,9192
64	POTE	3687624,367	-4620818,682	-2386880,31
65	PSTO	1404951,744	-6222655,101	134028,5885
66	RECF	5176588,625	-3618162,163	-887363,8556
67	RIOD	4280294,887	-4034431,248	-2458141,325
68	RIOH	1841101,028	-5973351,362	1264686,537
69	RWSN	1956973,438	-4217335,307	-4351745,497
70	S061	1272867,337	-6252772,141	-23801,7679
71	SALV	4863495,726	-3870312,365	-1426347,755
72	SANT	1769693,58	-5044574,169	-3468320,946
73	SCUB	1474538,08	-5811243,28	2168958,821
74	SMAR	3280748,419	-4468909,764	-3143408,63890
75	SSIA	95567,01354	-6197785,591	1500590,529
76	TAMP	-807922,6587	-5849358,253	2402967,68
77	TOL2	-1009229,178	-5939511,439	2094889,232
78	TUCU	2386117,195	-5171223,306	-2862949,126
79	TUNA	1818373,171	-6085596,917	610964,9824
80	UBAT	4129567,693	-4146742,954	-2527616,434
81	UBER	4014997,226	-4509022,445	-2052040,645
82	UCOR	2371430,049	-4904119,976	-3307377,464
83	UNRO	2627448,202	-4668383,173	-3450213,502
84	UNSA	2412830,447	-5271936,73	-2652209,041
85	VALL	1807579,747	-6006678,36	1151876,785
86	VARG	4165518,284	-4229235,795	-2327739,593
87	VBCA	2319240,826	-4411743,934	-3966484,122
88	VESL	2009329,818	-99741,4818	-6033158,436
89	VICO	4373283,316	-4059639,067	-2246959,67
90	VIL2	-310300,6561	-6060324,031	1957383,606
91	VIVI	1798110,737	-6103160,685	450209,5809
92	YOPA	1921562,41	-6053497,544	587652,0593

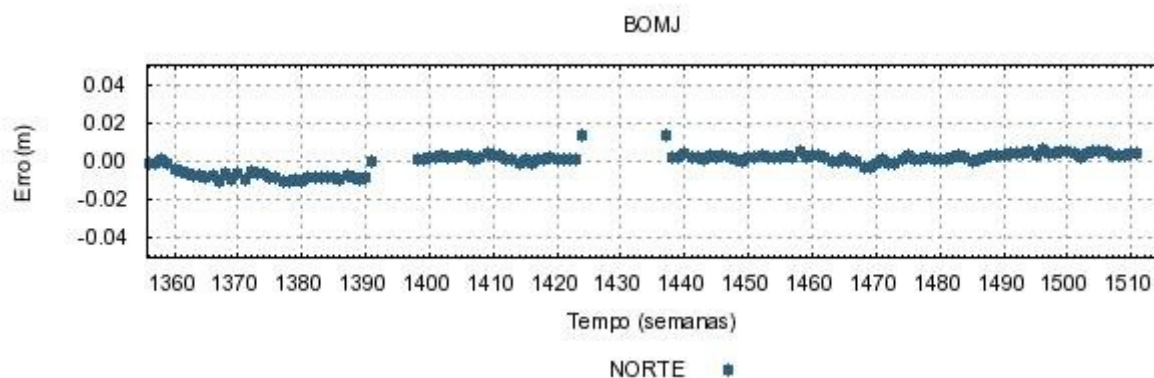


## APÊNCIDE D - Séries temporais das coordenadas das estações processadas e injuncionadas no sistema de referência local

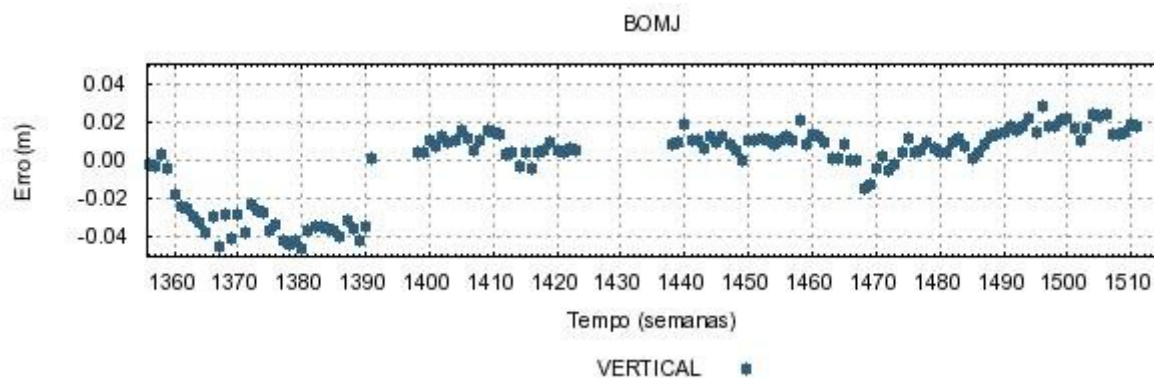
Neste Apêndice são apresentadas as séries temporais das coordenadas das estações BOMJ, CUIB, CRO1, IMPZ, LPGS, OHI2, VICO, PPTE, SJRP, ROSA, OURI, ILHA, LINS e KOUR, nas soluções semanais fixas, obtidas com base no processo de integração de redes, para o período de 2006 a 2008:



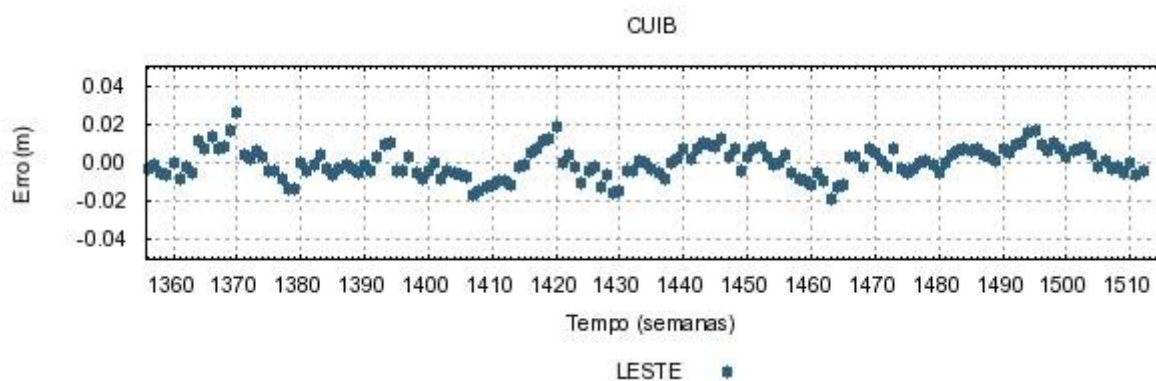
**Figura D.1** – Série temporal para a componente Leste da estação BOMJ.



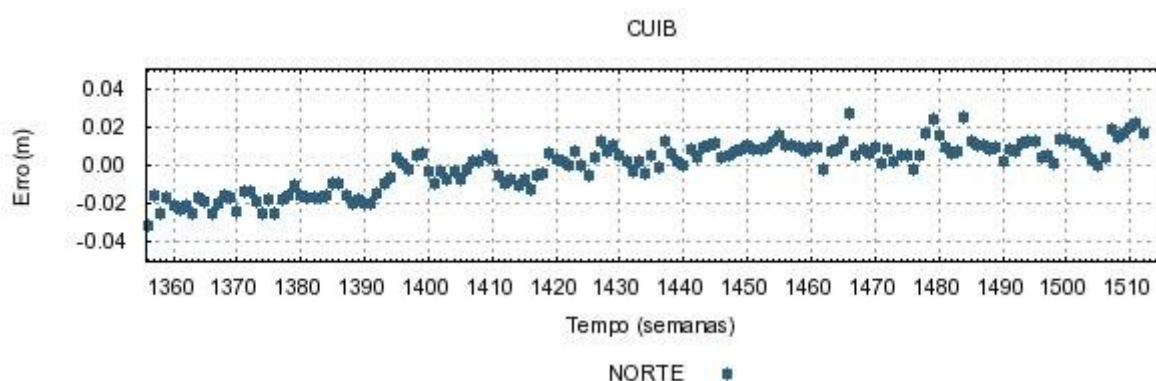
**Figura D.2** – Série temporal para a componente Norte da estação BOMJ.



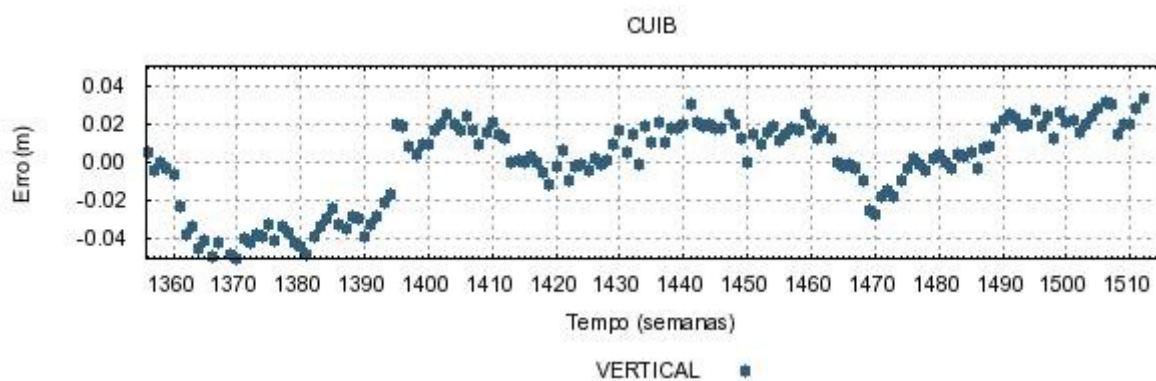
**Figura D.3** – Série temporal para a componente Vertical da estação BOMJ.



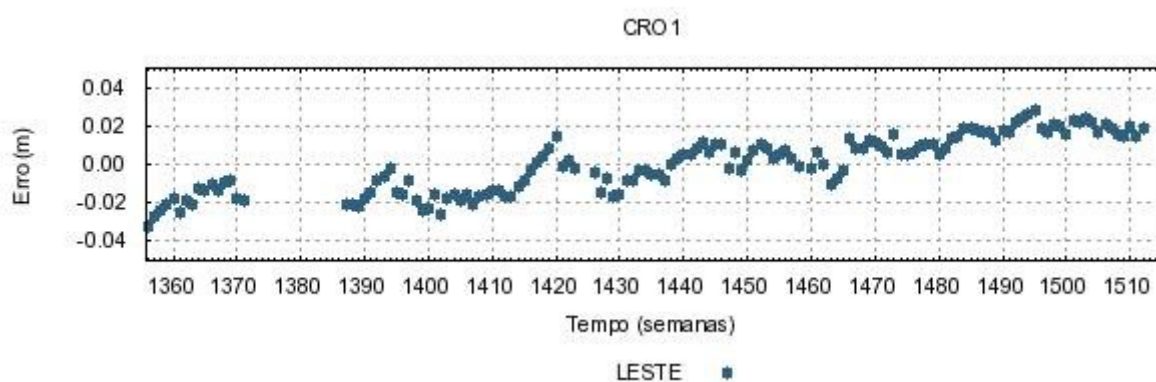
**Figura D.4** – Série temporal para a componente Leste da estação CUIB.



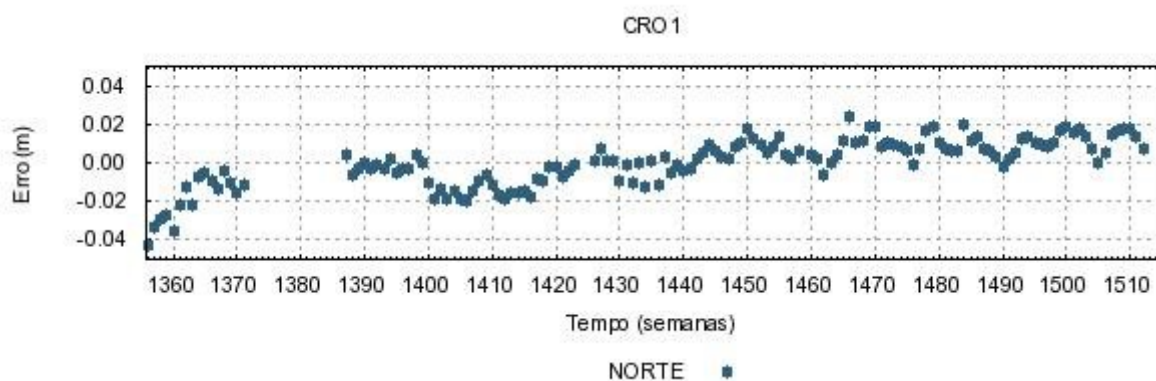
**Figura D.5** – Série temporal para a componente Norte da estação CUIB.



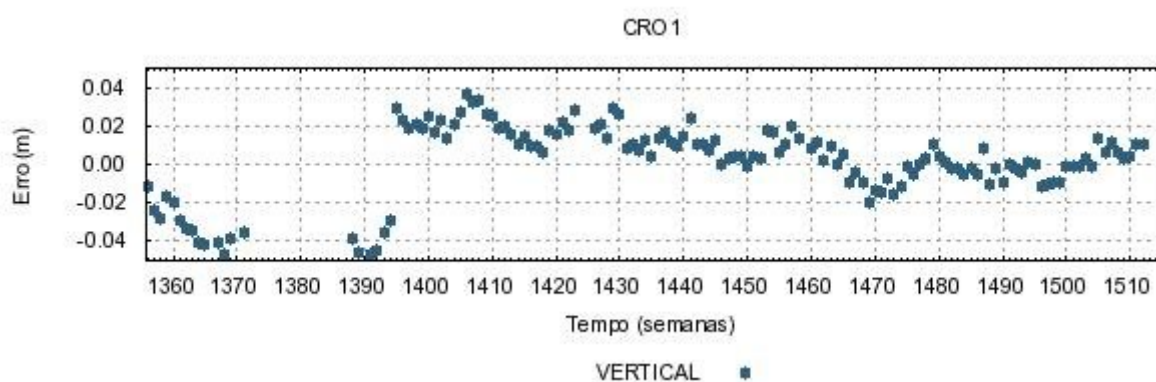
**Figura D.6** – Série temporal para a componente Vertical da estação CUIB.



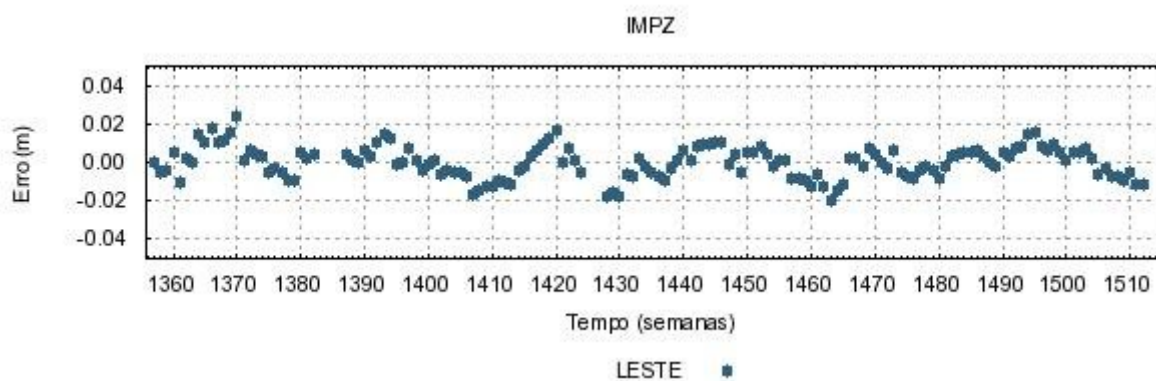
**Figura D.7** – Série temporal para a componente Leste da estação CRO1.



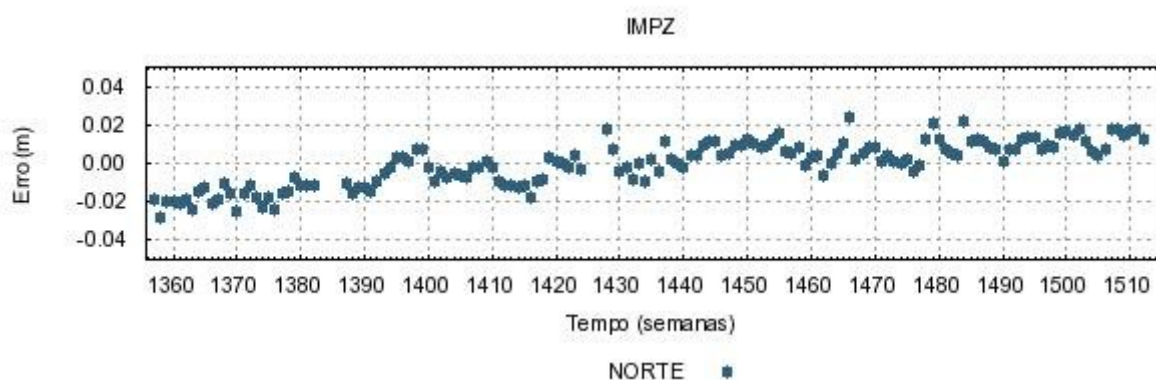
**Figura D.8** – Série temporal para a componente Norte da estação CRO1.



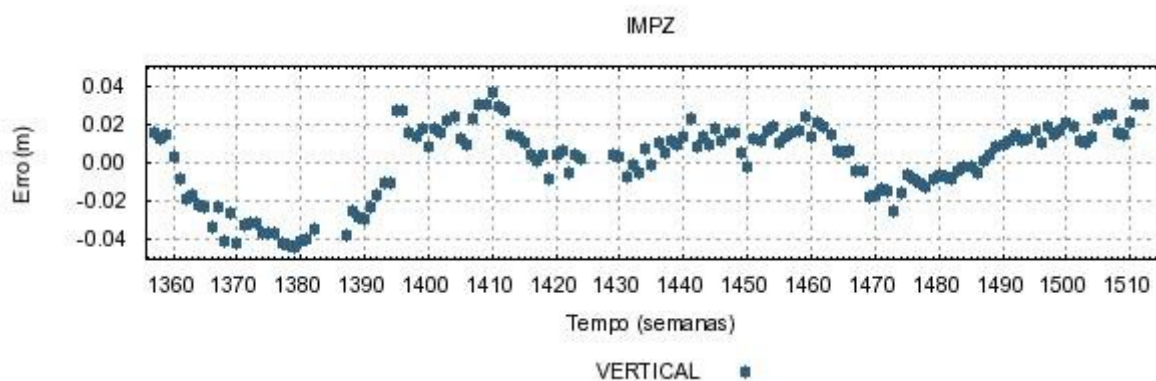
**Figura D.9** – Série temporal para a componente Vertical da estação CRO1.



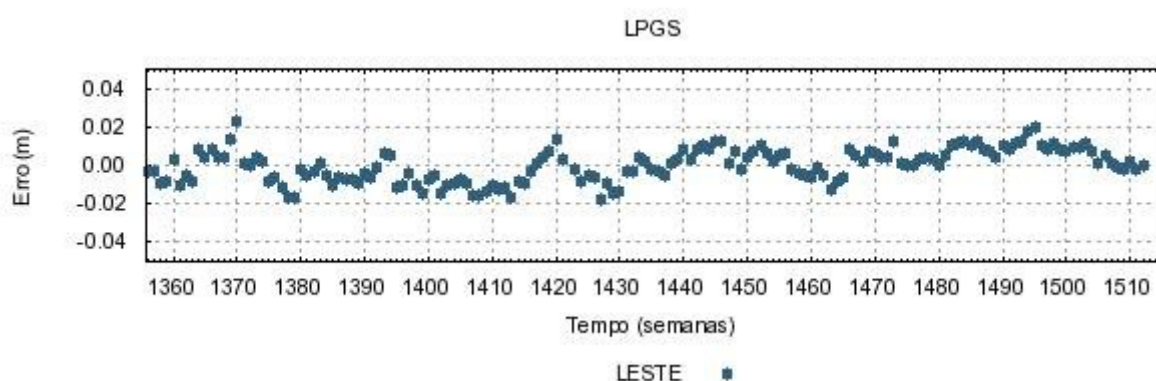
**Figura D.10** – Série temporal para a componente Leste da estação IMPZ.



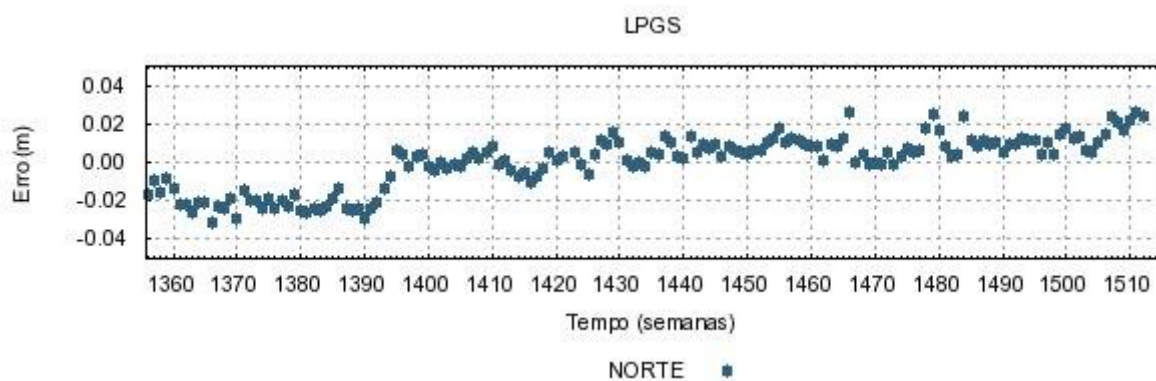
**Figura D.11** – Série temporal para a componente Norte da estação IMPZ.



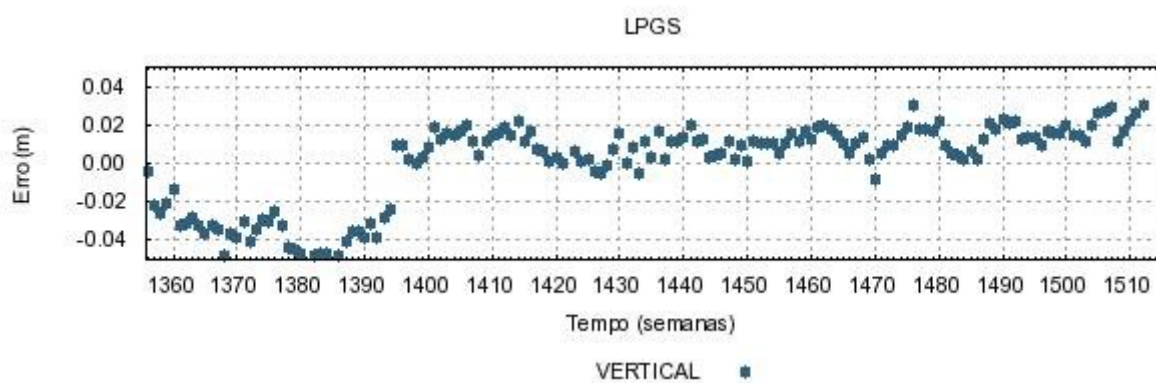
**Figura D.12** – Série temporal para a componente Vertical da estação IMPZ.



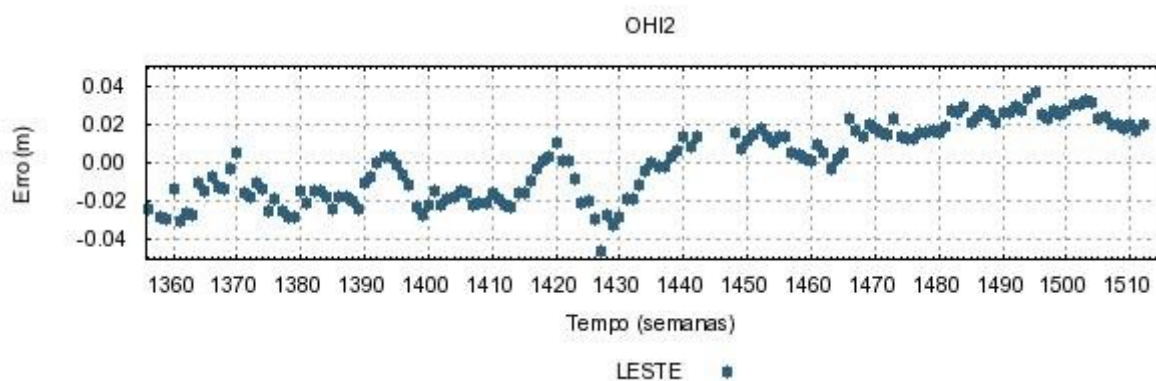
**Figura D.13** – Série temporal para a componente Leste da estação LPGS.



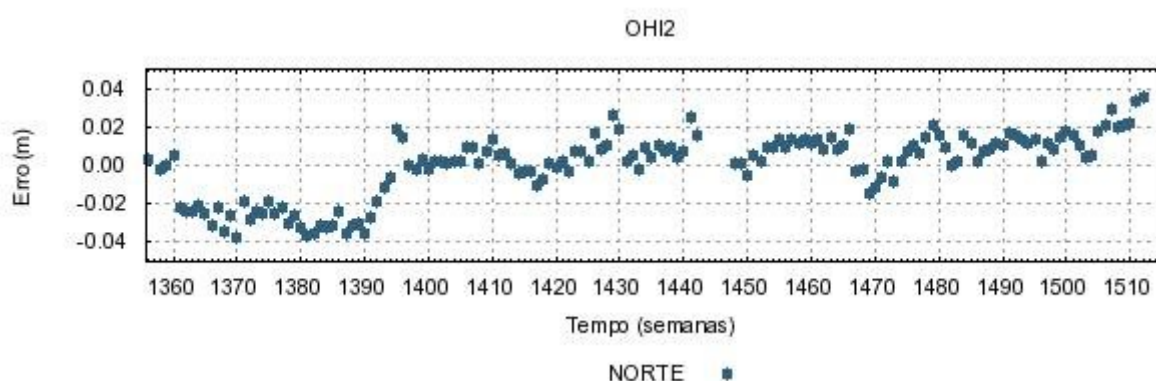
**Figura D.14** – Série temporal para a componente Norte da estação LPGS.



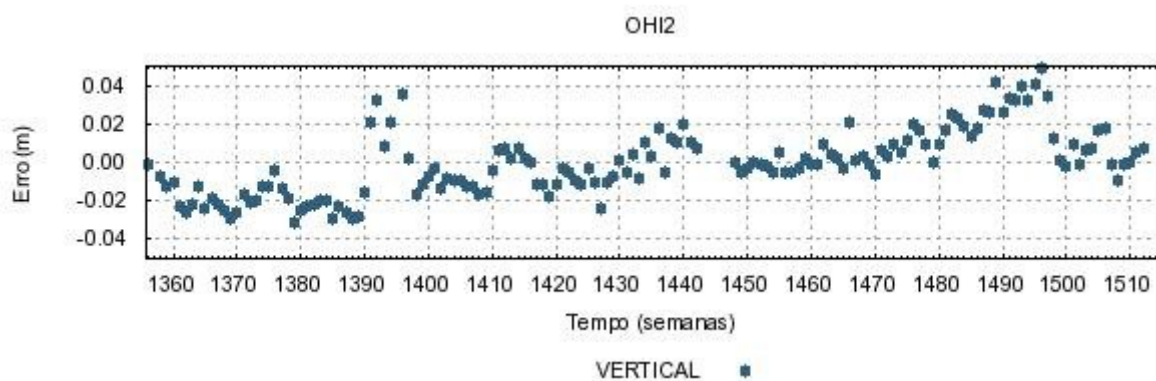
**Figura D.15** – Série temporal para a componente Vertical da estação LPGS.



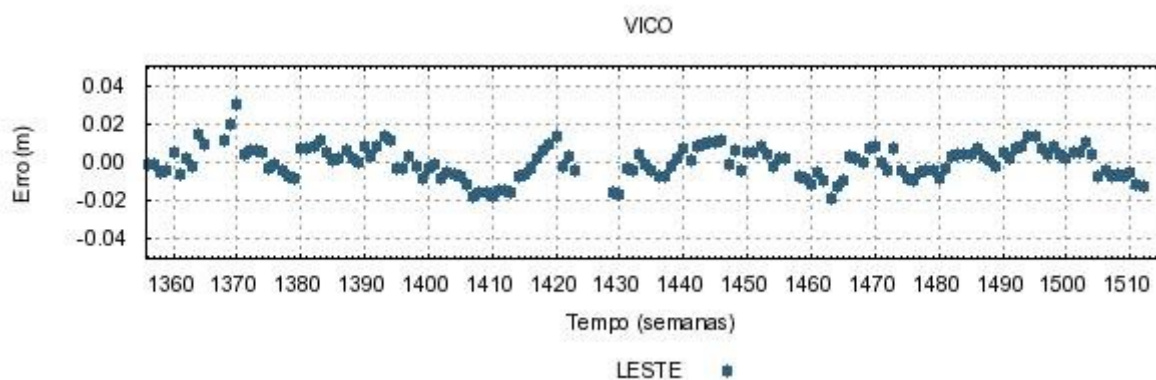
**Figura D.16** – Série temporal para a componente Leste da estação OHI2.



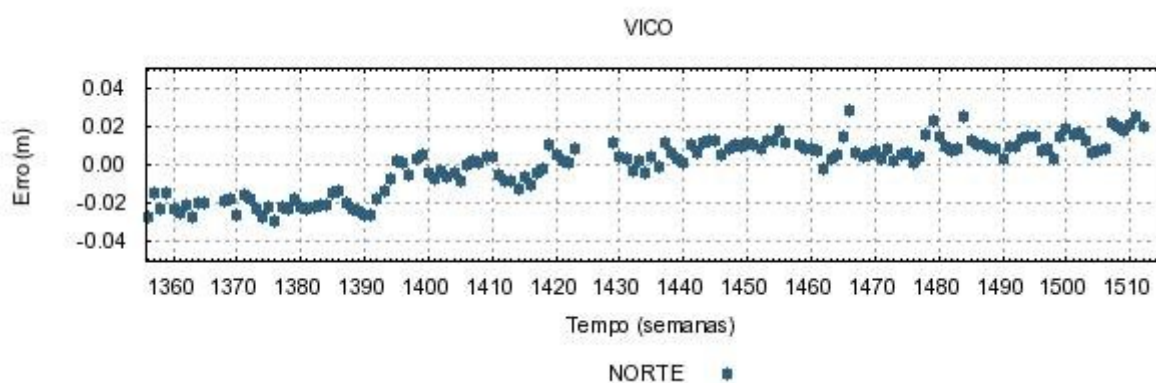
**Figura D.17** – Série temporal para a componente Norte da estação OHI2.



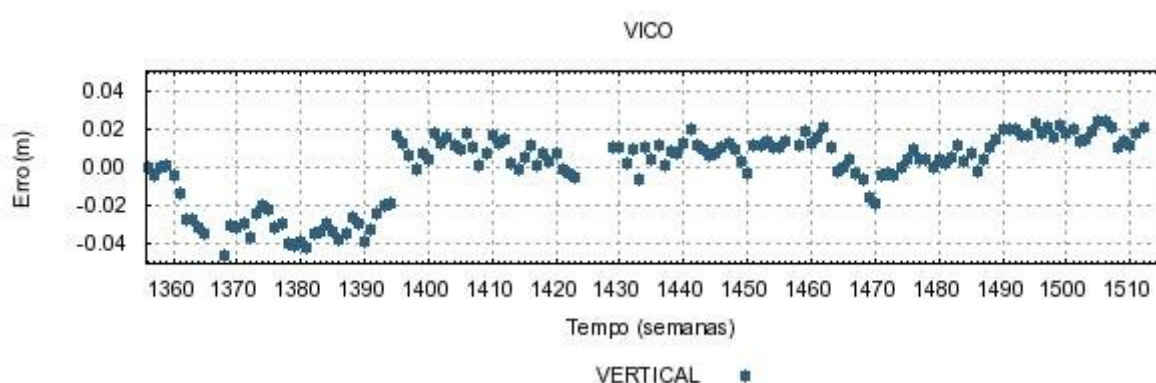
**Figura D.18** – Série temporal para a componente Vertical da estação OHI2.



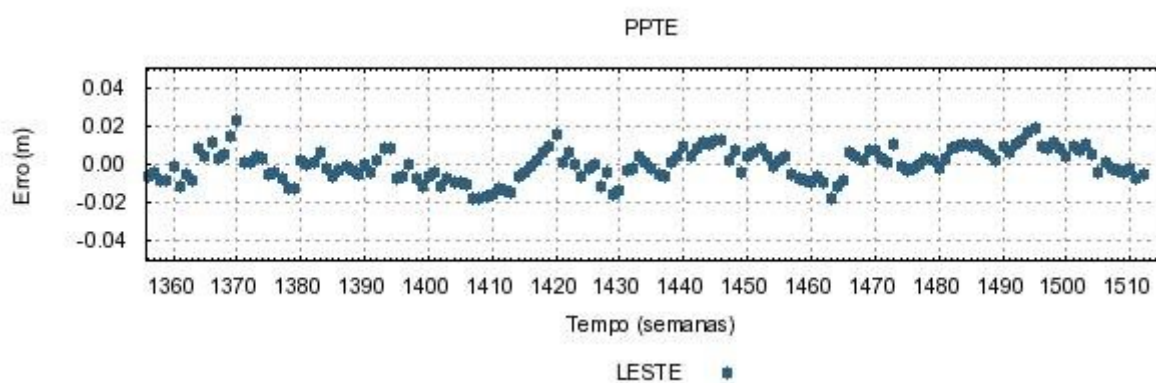
**Figura D.19** – Série temporal para a componente Leste da estação VICO.



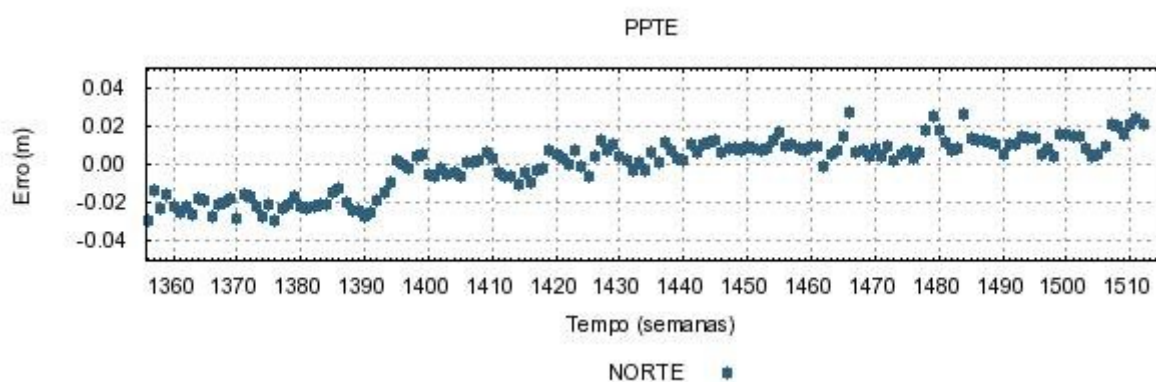
**Figura D.20** – Série temporal para a componente Norte da estação VICO.



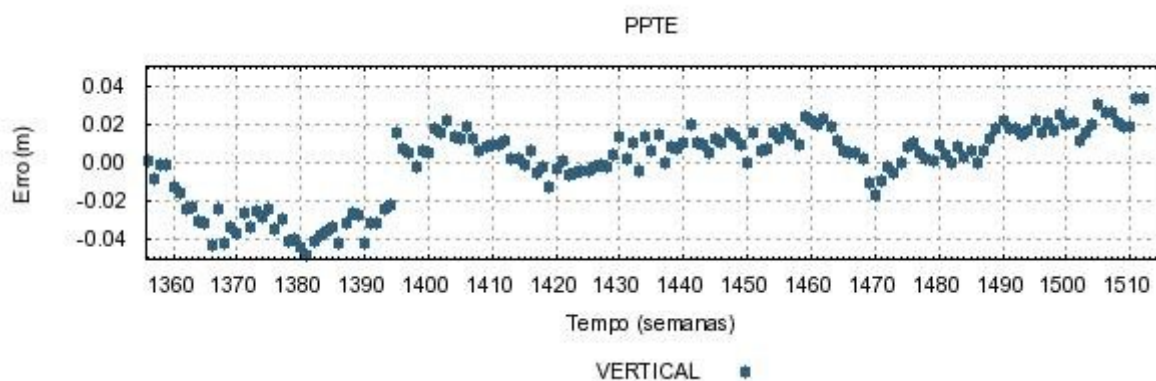
**Figura D.21** – Série temporal para a componente Vertical da estação VICO.



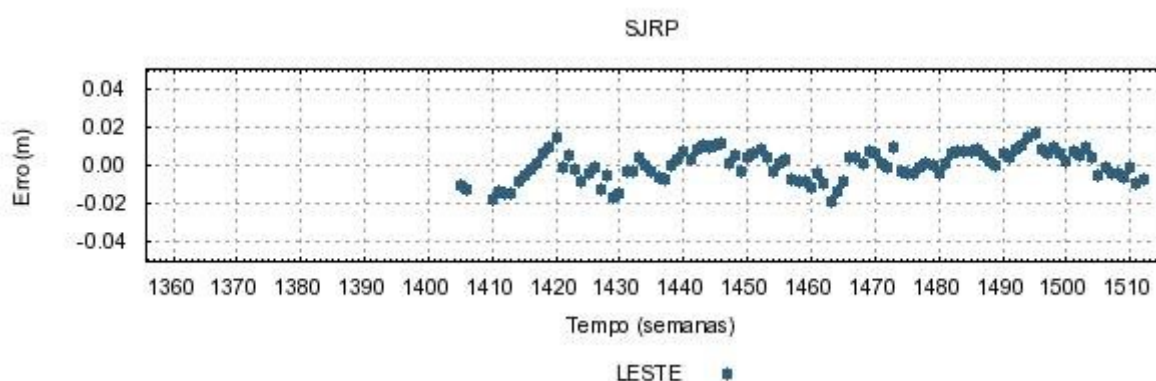
**Figura D.22** – Série temporal para a componente Vertical da estação PPTE.



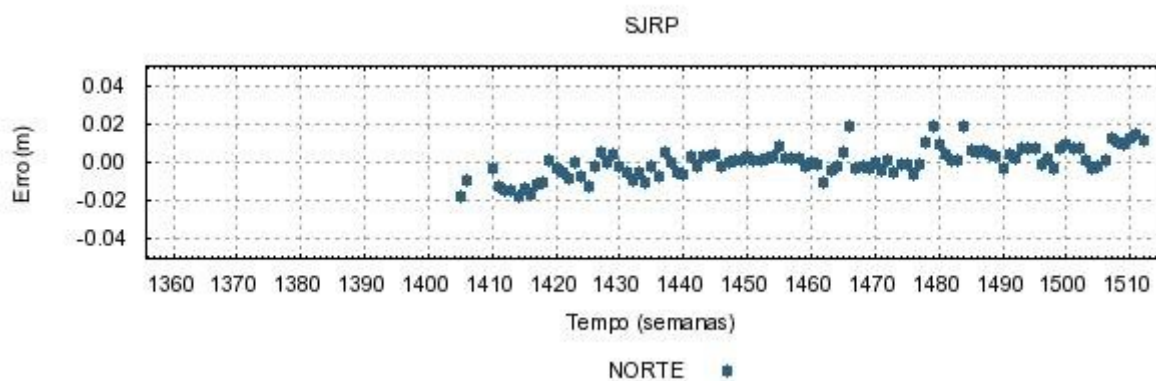
**Figura D.23** – Série temporal para a componente Norte da estação PPTE.



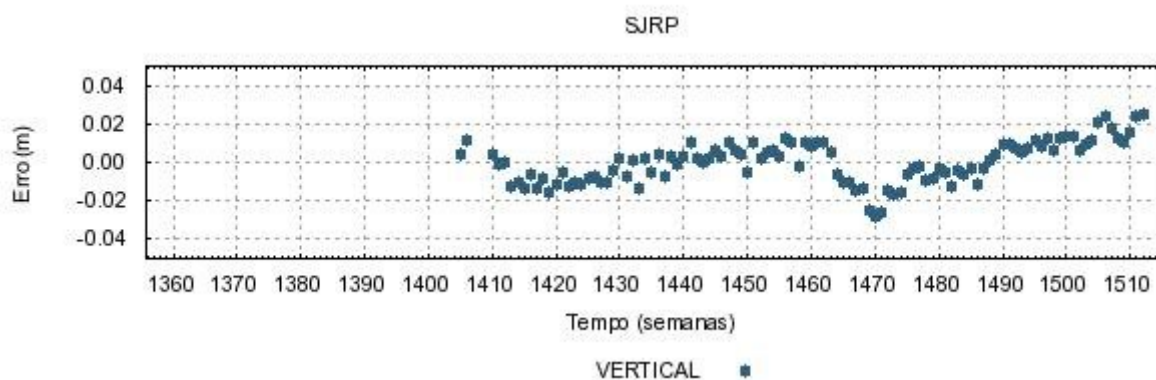
**Figura D.24** – Série temporal para a componente Vertical da estação PPTE.



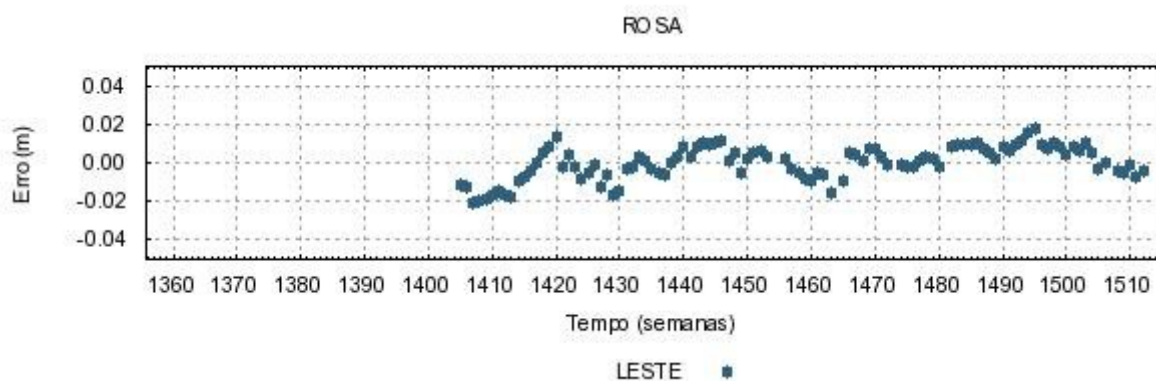
**Figura D.25** – Série temporal para a componente Leste da estação SJRP.



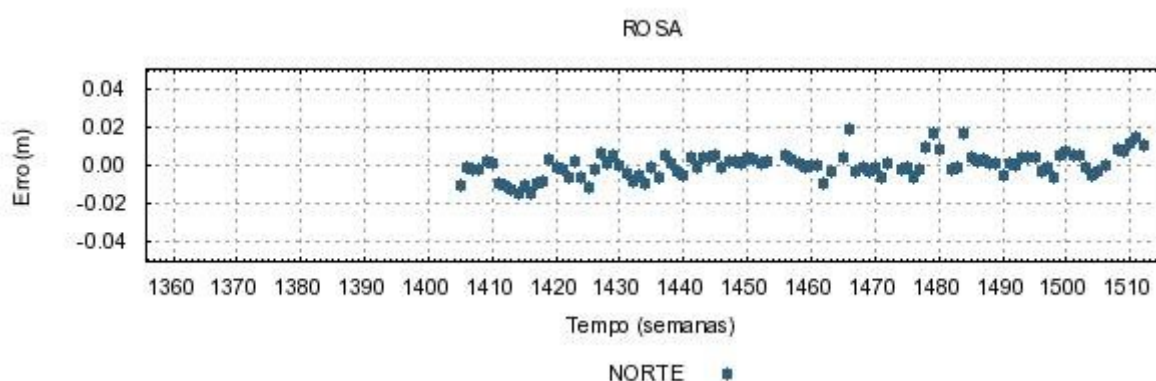
**Figura D.26** – Série temporal para a componente Norte da estação SJRP.



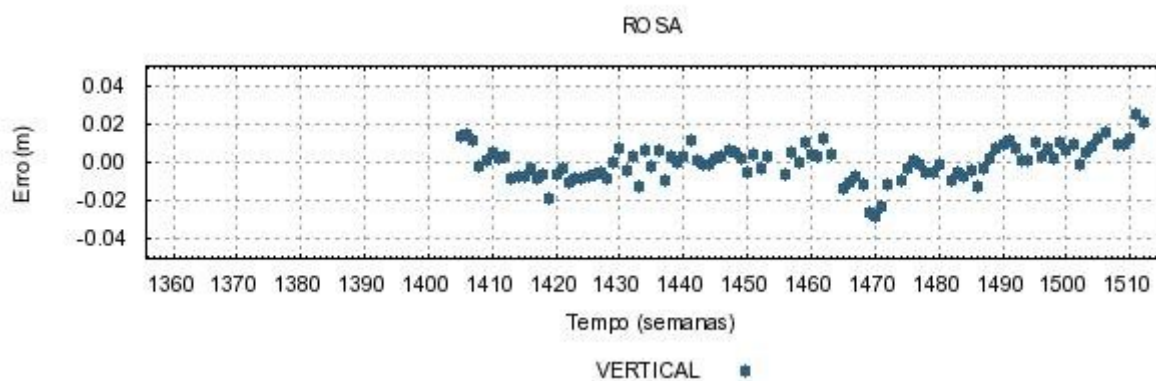
**Figura D.27** – Série temporal para a componente Vertical da estação SJRP.



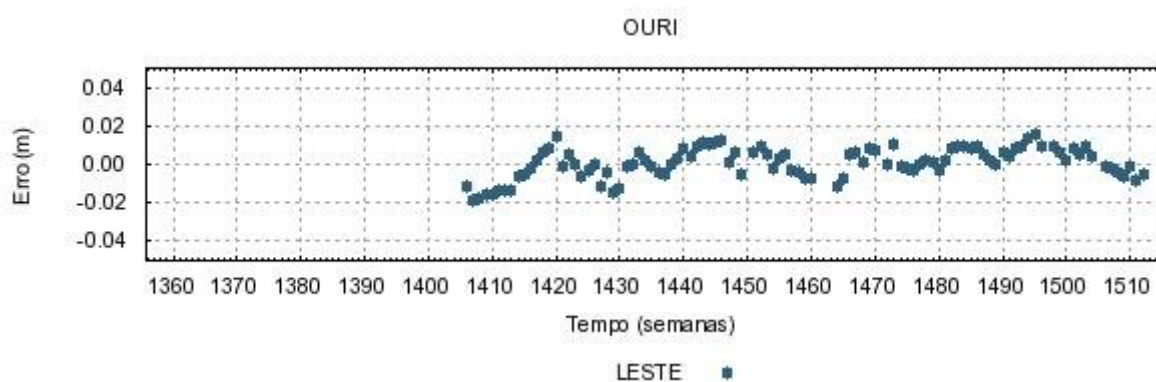
**Figura D.28** – Série temporal para a componente Leste da estação ROSA.



**Figura D.29** – Série temporal para a componente Norte da estação ROSA.

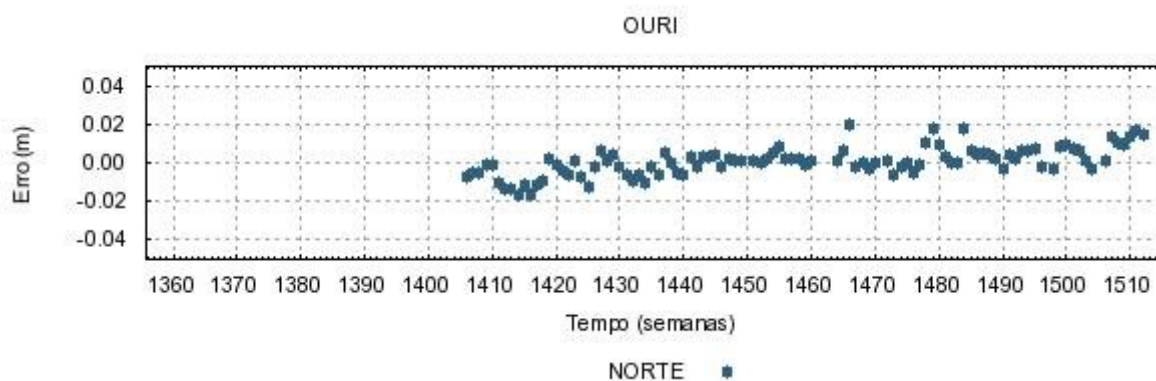


**Figura D.30** – Série temporal para a componente Vertical da estação ROSA.

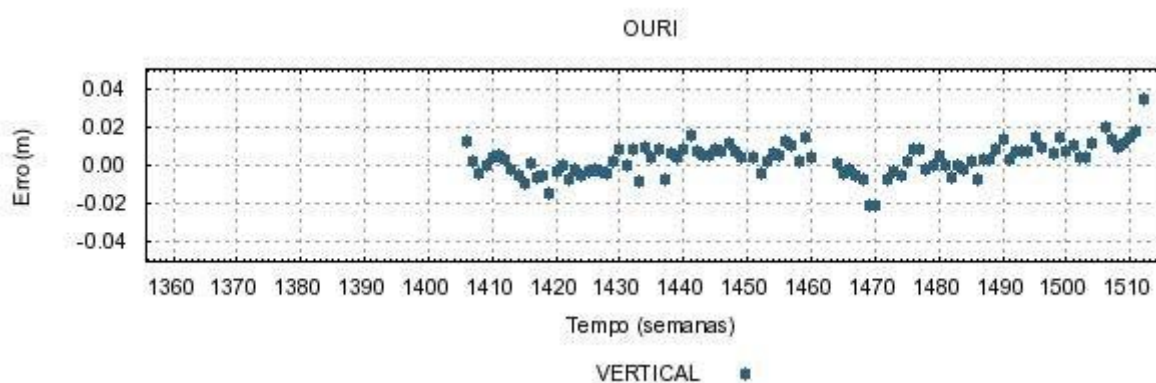


**Figura D.31** – Série temporal para a componente Leste da estação OURI.

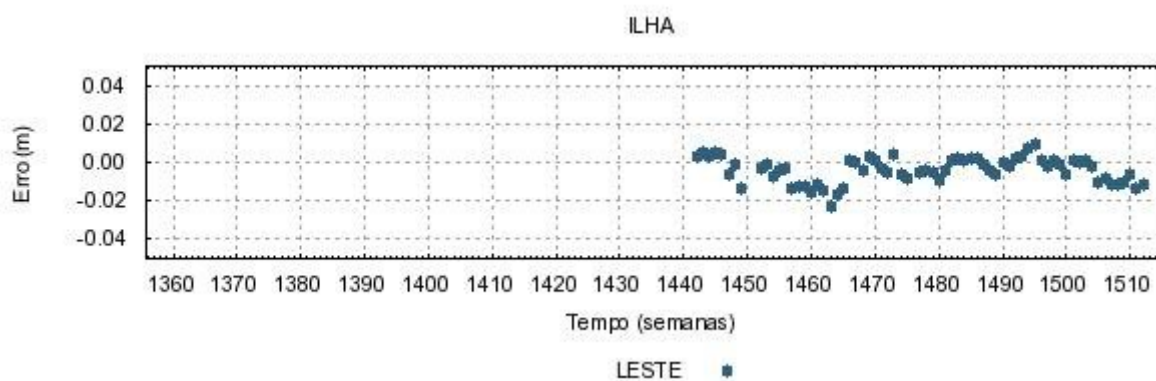




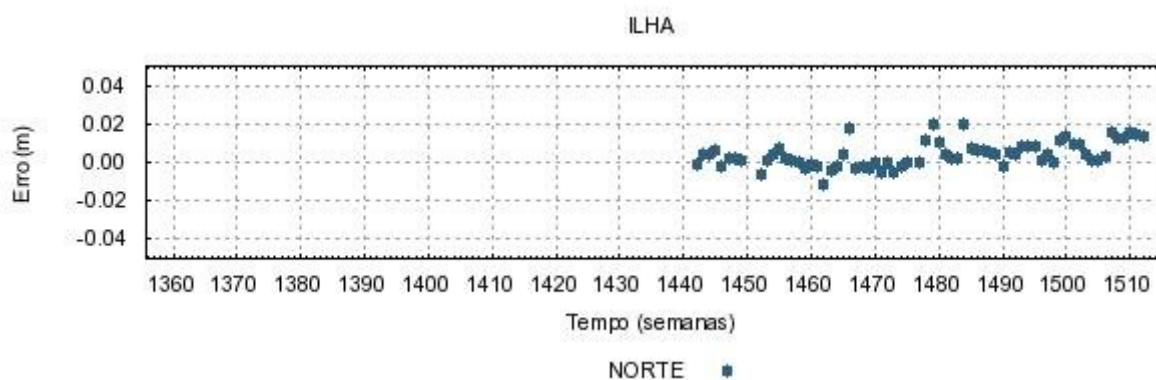
**Figura D.32** – Série temporal para a componente Norte da estação OURI.



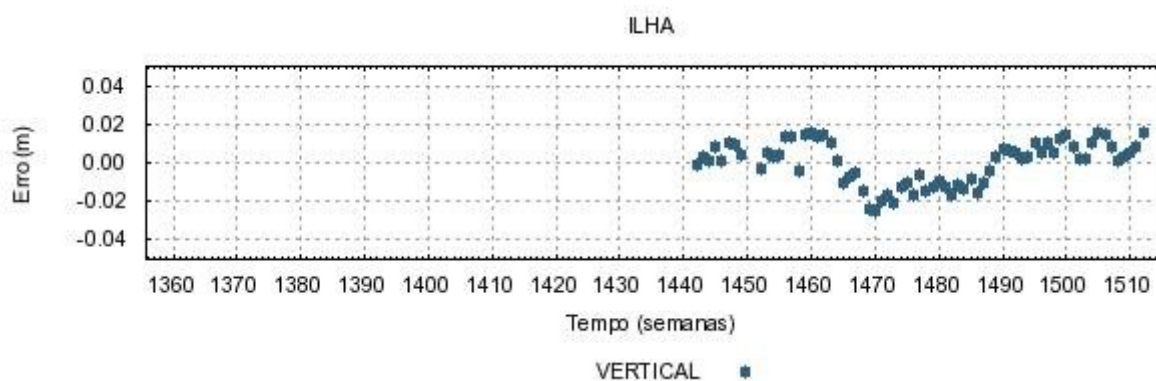
**Figura D.33** – Série temporal para a componente Vertical da estação OURI.



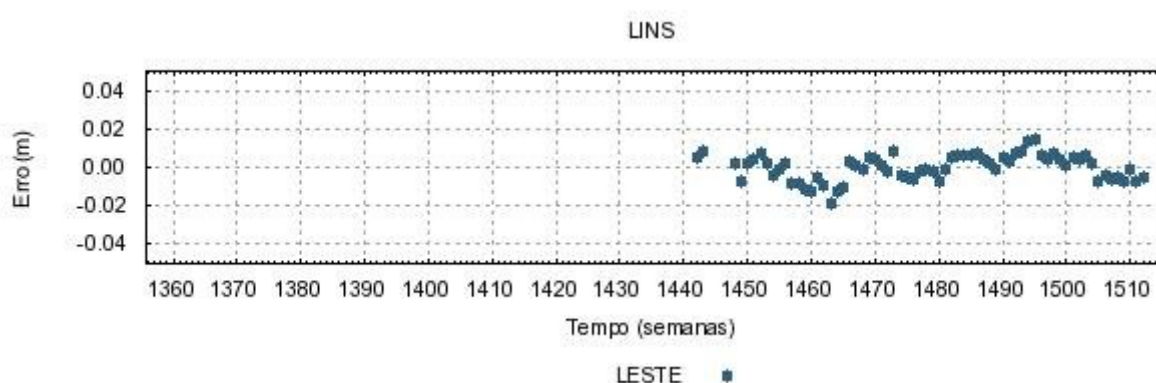
**Figura D.34** – Série temporal para a componente Leste da estação ILHA.



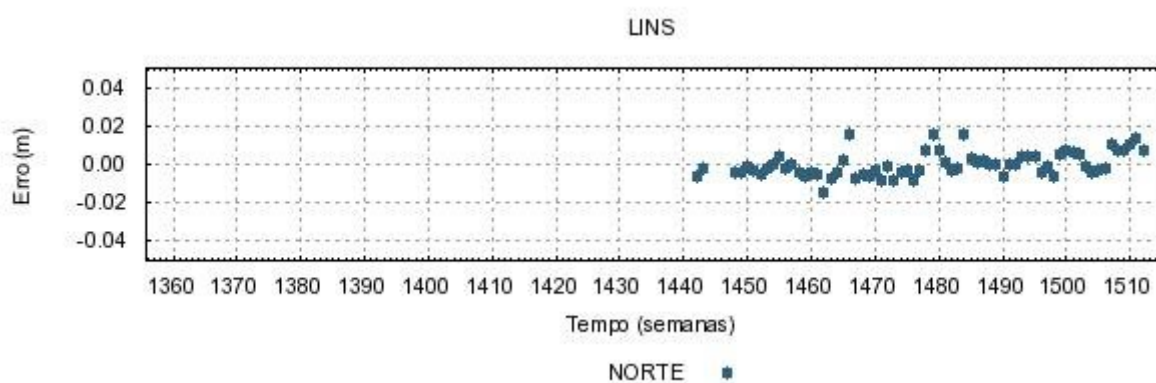
**Figura D.35** – Série temporal para a componente Norte da estação ILHA.



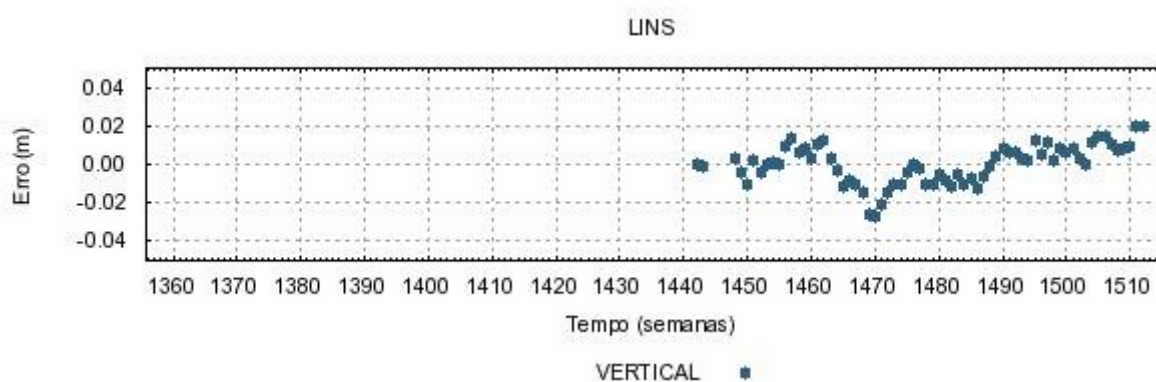
**Figura D.36** – Série temporal para a componente Vertical da estação ILHA.



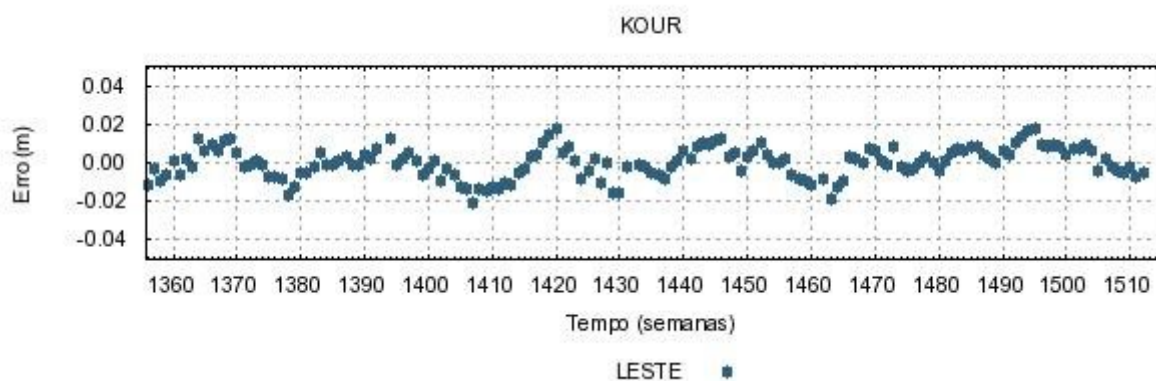
**Figura D.37** – Série temporal para a componente Leste da estação LINS.



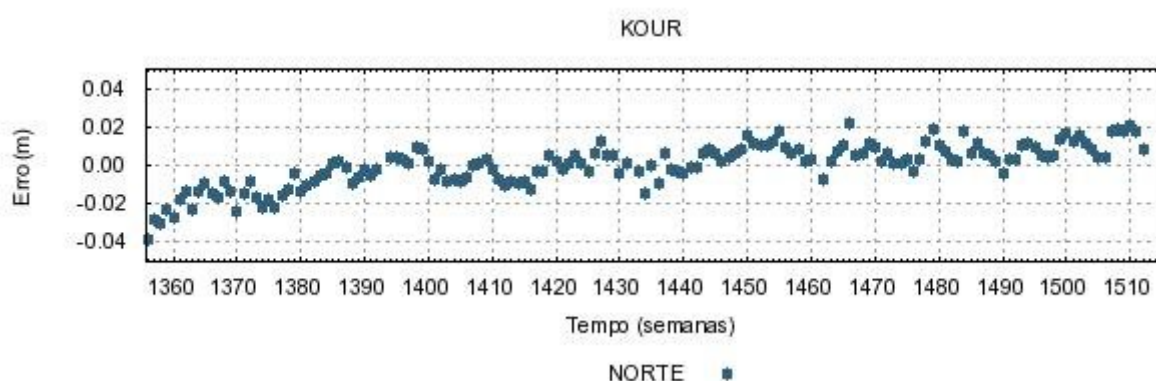
**Figura D.38** – Série temporal para a componente Norte da estação LINS.



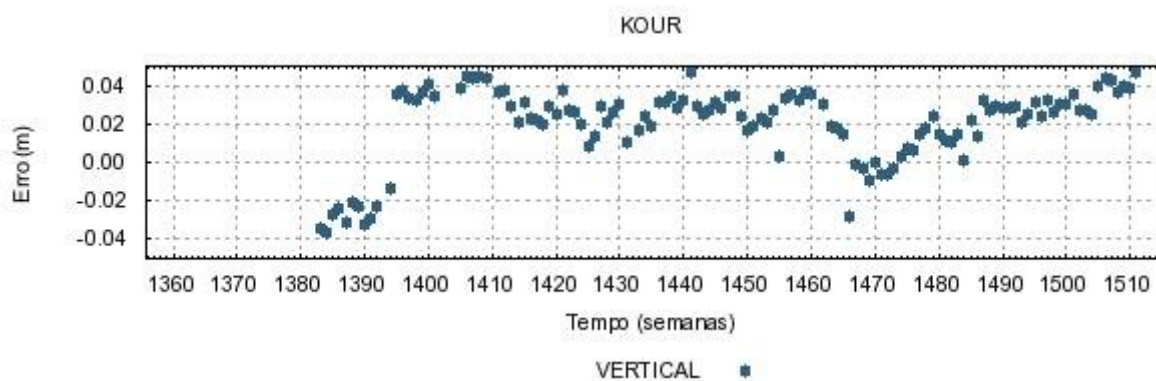
**Figura D.39** – Série temporal para a componente Vertical da estação LINS.



**Figura D.40** – Série temporal para a componente Leste da estação KOUR.



**Figura D.41** – Série temporal para a componente Norte da estação KOUR.



**Figura D.42** – Série temporal para a componente Norte da estação KOUR.

## APÊNDICE E – Velocidades das Estações SIRGAS.

Neste Apêndice encontram-se as velocidades para as componentes X, Y e Z, em metros, de 92 das 194 estações envolvidas no processo de integração. Para a estimativa das velocidades, considerou-se a quantidade de dados disponíveis no período analisado.

Nº	Estação	VX (m/ano)	VY (m/ano)	VZ (m/ano)
1	AREQ	0,0032	-0,0164	0,0030
2	BANS	0,0031	-0,0135	0,0099
3	BDOS	0,0234	-0,0008	0,0165
4	BELE	0,0058	-0,0154	0,0126
5	BOGA	-0,0174	0,0468	0,0160
6	BOGT	-0,0106	0,0407	0,0115
7	BOMJ	0,0055	-0,0132	0,0101
8	BRAZ	0,0069	-0,0173	0,0077
9	BRFT	0,0057	-0,0145	0,0057
10	BRMU	-0,0072	-0,0149	0,0111
11	BUCA	0,0084	-0,0060	0,0159
12	BUEN	0,0101	-0,0130	0,0123
13	CALI	0,0078	-0,0162	0,0128
14	CART	0,0147	-0,0053	0,0092
15	CFAG	0,0128	-0,0102	0,0071
16	CHET	-0,0049	-0,0072	0,0010
17	CHIH	-0,0115	-0,0109	-0,0031
18	CHPI	0,0100	-0,0183	0,0048
19	COL2	-0,0034	-0,0123	0,0000
20	CONZ	0,0412	-0,0124	0,0102
21	COPO	0,0250	-0,0055	0,0137
22	CRAT	0,0027	-0,0125	0,0083
23	CRCS	0,0065	-0,0100	0,0110
24	CRO1	0,0109	-0,0003	0,0127
25	CUCU	0,0073	-0,0093	0,0139
26	CUIB	0,0058	-0,0165	0,0077
27	DORA	0,0111	-0,0213	0,0143
28	ETCG	0,0161	-0,0004	0,0170
29	FLOR	0,0009	-0,0075	0,0071
30	GLPS	0,0530	-0,0134	0,0072
31	GUAT	0,0060	-0,0106	0,0009
32	GVAL	0,0099	-0,0179	0,0072
33	HER2	-0,0135	-0,0096	-0,0040
34	IMPZ	0,0017	-0,0111	0,0105
35	INEG	0,0010	0,0241	-0,0174
36	KOUR	0,0162	-0,0268	0,0129
37	LHCL	0,0078	-0,0145	0,0035
38	LPAZ	-0,0419	0,0151	0,0197
39	LPGS	0,0103	-0,0189	0,0007
40	MANA	0,0088	-0,0067	0,0045
41	MAPA	0,0071	-0,0155	0,0110
42	MARA	0,0110	-0,0038	0,0130
43	MCLA	0,0084	-0,0161	0,0073

44	MECO	0,0071	-0,0135	0,0069
45	MEDE	0,0076	-0,0099	0,0125
46	MERI	-0,0061	-0,0089	0,0009
47	MEXI	-0,0191	-0,0007	0,0220
48	MOTE	0,0150	0,0028	0,0077
49	MPLA	0,0116	-0,0176	0,0079
50	MTY2	-0,0087	-0,0094	-0,0020
51	MZAC	0,0159	-0,0147	0,0041
52	NAUS	0,0054	-0,0142	0,0102
53	NEIA	0,0125	-0,0192	0,0046
54	NEVA	0,0067	-0,0060	0,0155
55	OAX2	0,0004	-0,0109	0,0051
56	OHI2	0,0195	-0,0075	-0,0039
57	ONRJ	0,0049	-0,0140	0,0085
58	PALM	0,0197	-0,0142	-0,0125
59	PARC	0,0112	-0,0155	0,0035
60	PERA	0,0083	-0,0091	0,0148
61	POAL	0,0103	-0,0164	0,0049
62	POPA	0,0064	-0,0047	0,0122
63	POVE	0,0051	-0,0194	0,0063
64	PPTA	0,0086	-0,0157	0,0074
65	PSTO	0,0132	-0,0058	0,0153
66	RECF	0,0041	-0,0131	0,0090
67	RIOD	0,0077	-0,0167	0,0079
68	RIOH	0,0160	-0,0097	0,0139
69	RWSN	0,0068	-0,0174	0,0007
70	S061	0,0123	-0,0075	0,0080
71	SALV	0,0120	-0,0166	0,0068
72	SANT	0,0268	-0,0114	0,0083
73	SCUB	-0,0009	-0,0113	0,0048
74	SMAR	0,0072	-0,0147	0,0061
75	SSIA	0,0084	-0,0141	0,0058
76	TAMP	-0,0079	-0,0113	-0,0006
77	TOL2	-0,0040	-0,0077	-0,0010
78	TUCU	0,0072	-0,0047	0,0103
79	TUNA	0,0061	-0,0106	0,0119
80	UBAT	0,0298	-0,0121	0,0034
81	UBER	0,0071	-0,0161	0,0058
82	UCOR	0,0094	-0,0117	0,0063
83	UNRO	0,0100	-0,0166	0,0038
84	UNSA	0,0262	-0,0468	-0,0103
85	VALL	0,0124	-0,0081	0,0141
86	VARG	0,0058	-0,0135	0,0067
87	VBCA	0,0067	-0,0152	0,0040
88	VESL	0,0093	-0,0050	0,0044
89	VICO	0,0067	-0,0144	0,0088
90	VIL2	-0,0053	-0,0096	0,0011
91	VIVI	0,0022	-0,0075	0,0069
92	YOPA	0,0050	-0,0149	0,0132

## ANEXO A – Coeficientes do modelo FES2004.

Correções referentes ao efeito das cargas oceânicas para a estação BRAZ no formato

BQL:

```

$$ Ocean loading displacement
$$
$$ Calculated on Ore using olfg/olmpp of F.-G. Scherneck
$$
$$ COLUMN ORDER:  M2  S2  N2  K2  K1  O1  P1  Q1  MF  MM  SSA
$$
$$ ROW ORDER:
$$ AMPLITUDES (m)
$$   RADIAL
$$   TANGENTL    EW
$$   TANGENTL    NS
$$ PHASES (degrees)
$$   RADIAL
$$   TANGENTL    EW
$$   TANGENTL    NS
$$
$$ Displacement is defined positive in upwards, South and West direction.
$$ The phase lag is relative to Greenwich and lags positive. The
$$ Gutenberg-Bullen Green's function is used. In the ocean tide model the
$$ deficit of tidal water mass has been corrected by subtracting a uniform
$$ layer of water with a certain phase lag globally.
$$
$$ Complete <model name> : No interpolation of ocean model was necessary
$$ <model name>_PP       : Ocean model has been interpolated near the station
$$                        (PP = Post-Processing)
$$
$$ Ocean tide model: FES2004
$$
$$ END HEADER
$$
$$
BRAZ 41606M001
$$ Complete FES2004
$$ Computed by OLF, F.-G. Scherneck, Onsala Space Observatory 25-Oct-06
$$ BRAZ 41606M001,          RADI TANG lon/lat: 312.1221 -15.9475
.01155 .00393 .00256 .00104 .00061 .00082 .00020 .00031 .00047 .00027 .00022
.00250 .00095 .00047 .00028 .00049 .00059 .00017 .00015 .00013 .00005 .00002
.00170 .00055 .00037 .00016 .00089 .00089 .00030 .00017 .00010 .00005 .00003
 34.8   50.0   30.5   43.5 -160.7  -81.6 -161.0  -91.3 -171.1 -174.7 -178.7
 22.0   42.3   14.5   35.5   37.4  -21.2   36.9  -50.9  159.0  154.3  170.5
 44.6   84.9    6.5   87.1  116.9   86.5  116.8   60.0  179.6  173.5  177.8
$$ END TABLE

```

**ANEXO B – Quadro com a identificação das estações utilizadas no período de 2006 a 2008 no processo de integração das soluções.**

<b>Estação</b>	<b>Identificação</b>	<b>País</b>	<b>Placa Litossférica</b>	<b>Rede</b>
Arequipa	AREQ 42202M005	Peru	SOAM	IGS
Belém	BELE 41622M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Bogotá	BOGA 41901M002	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Bogotá	BOGT 41901M001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Bom Jesus	BOMJ 41612M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Brasília	BRAZ 41606M001	Brasil	SOAM	RBMC/IGS
Eusébio	BRFT 41602M002	Brasil	SOAM	RBMC/IGS
Bermudas	BRMU 42501S004	United Kingdom	NOAM	IGS
Bucaramanga	BUCA 41911S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Buenaventura	BUEN 41912S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Campeche	CAM2 40514M001	México	NOAM	RGNA
CALI	CALI 41903S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Chetumal	CHET 40526M001	México	NOAM	RGNA
Chihuahua	CHIH 40525M001	México	NOAM	RGNA
Cachoeira Paulista	CHPI 41609M003	Brasil	SOAM	RBMC/IGS05
Colima	COL2 40524M001	México	NOAM	RGNA
Concepcion-TIGO	CONZ 41719M002	Chile	SOAM	IGS05
Córdoba	CORD 41511M001	Argentina	SOAM	IGS05/RAMSAC
Crato	CRAT 41619M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
St. Croix VLBA	CRO1 43201M001	USA	CARB	IGS05
Cuiabá	CUIB 41603M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Culiacán	CULI 40523M001	México	NOAM	RGNA
Heredia	ETCG 40602M001	Costa Rica	CARB	UN-CR
Fortaleza	FORT 41602M001	Brasil	SOAM	RBMC/IGS
Galapagos	GLPS 42005M002	Equador	SOAM	IGS05
Guatemala	GUAT 40901S001	Guatemala	NOAM	IGS
Governador Valadares	GVAL 41623M001	Brasil	SOAM	RBMC
Hermosillo	HER2 40522M001	México	NOAM	RGNA
Buenos Aires	IGM1 41505M003	Argentina	SOAM	RAMSAC
Kourou	KOUR 97301M210	French Guyana	SOAM	IGS
La Plata	LPGS 41510M001	Argentina	SOAM	IGS05/RAMSAC
Manágua	MANA 41201S001	Nicaragua	CARB	IGS05
Maracaibo	MARA 42402M001	Venezuela	CARB	REMOS
Montes Claros	MCLA 41624M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Medellín	MEDE 41921S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Merida	MERI 40520M001	México	NOAM	RGNA
Mexicali	MEXI 40519M001	México	PCFC	RGNA
Monterrey	MTY2 40518M001	México	NOAM	RGNA
Mendoza	MZAC 41503M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Cananéia	NEIA 41620M002	Brasil	SOAM	RBMC
Neiva	NEVA 41923S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Oaxaca	OAX2 40517M001	México	NOAM	RGNA
O'Higgins	OHI2 66008M005	Antártica	ANTA	IGS05
Palmer	PALM 66005M002	Antártica	ANTA	IGS
Paraná	PARA 41610M001	Brasil	SOAM	RBMC/IGS
Pereira	PERA 41905S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO

Porto Alegre	POAL 41616M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Pasto	PSTO 41925S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Puerto Rico	PUR3 82001S003	Puerto Rico	NOAM	-
Recife	RECF 41617M001	Brasil	SOAM	IGS/RBMC/RIBaC
Rio de Janeiro	RIOD 41608M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Rio Grande	RIOG 41507M004	Argentina	SOAM	IGS/RAMSAC
Riohacha	RIOH 41927S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Rawson	RWSN 41513M001	Argentina	SOAM	RAMSAC/TIGA
Salvador	SALV 41618M001	Brasil	SOAM	RBMC
Santa Marta	SANT 41705M003	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Santiago de Cuba	SCUB 40701M001	Cuba	NOAM	IGS05
Santa Maria	SMAR 41621M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Tampico	TAMP 40516M001	México	NOAM	RGNA
Toluca	TOL2 40515M001	México	NOAM	RGNA
Tunja	TUNA 41930S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Ubatuba	UBAT 41627M001	Brasil	SOAM	RBMC
Uberaba	UBER 41625M001	Brasil	SOAM	RBMC
Rosário	UNRO 41525M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Salta	UNSA 41514M001	Argentina	SOAM	IGS05/RAMSAC
Valledupar	VALL 41906S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Varginha	VARG 41626M001	Brasil	SOAM	RBMC
Bahia Blanca	VBCA 41512M001	Argentina	SOAM	RAMSAC/TIGA
Sanae Veslesk	VESL 66009M001	Antártica	ANTA	IGS
Viçosa	VICO 41613M001	Brasil	SOAM	RBMC e RIBaC
Villahermosa	VIL2 40527M001	México	NOAM	RGNA
Yopal	YOPA 41932S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Ilha Solteira	ILHA	Brasil	SOAM	GNSS SP
Lins	LINS	Brasil	SOAM	GNSS SP
Ourinhos	OURI	Brasil	SOAM	GNSS SP
Rosana	ROSA	Brasil	SOAM	GNSS SP
São José do Rio Preto	SJRP	Brasil	SOAM	GNSS SP
Presidente Prudente	PPTE 41611M002	Brasil	SOAM	RBMC/GNSS SP
Imperatriz	IMPZ 41615M001	Brasil	SOAM	RBMC
Araparica	ALAR 41653M001	Brasil	SOAM	RBMC
Manaus	NAUS 41614M002	Brasil	SOAM	RBMC
Apartado	APTO 41933S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Arauca	ARCA 41909S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Ushuaia	AUTF 41515S001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Chitre	AZUE 41301M001	Panamá	CARB	Panama-CORS
Azul	AZUL 41529M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Barbados	BDOS 43401M001	Barbados	CARB	IGS
Puerto Berrio	BERR 41910S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Boa Vista	BOAV 41636M001	Brasil	SOAM	RBMC
Barranquilla	BQLA 41934S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Cayman Islands	CBSB 80402M001	United Kingdom	CARB	CORS
Euzébio	CEEU 41602M003	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Vitória	CEFE 41637M001	Brasil	SOAM	RBMC
Caucete	CFAG 41517S001	Argentina	SOAM	IGS/RAMSAC
Ensenada	CIC1 40508M002	México	NOAM	IGS/RGNA
Copiapo	COPO 41714S001	Chile	SOAM	IGS
Caracas	CRCS 42401M001	Venezuela	SOAM	REMOS



Cucuta	CUCU 41904S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Cuenca	CUEC 42009M001	Equador	SOAM	REGME
Culiacan	CULC 40529M001	México	NOAM	RGNA
David	DAVI 41302M001	Panamá	COCO	Panama-CORS
George Town	EXU0 43606M001	Bahamas	NOAM	-
Florência	FLOR 41916S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Fuquene	FQNE 41936S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Cayman Islands	GCGT 80401M001	United Kingdom	CARB	-
Jataí	GOJA 41654M001	Brasil	SOAM	RBMC
Goldstone	GOLD 40405S031	EUA	NOAM	IGS05
Grenada	GRE0 43501S001	Grenada	CARB	UCAR/COSMIC
Guayaquil	GYEC 42007M001	Equador	SOAM	REGME
Panamá	IGN1 41303M001	Panamá	CARB	Panama-CORS
Imbituba	IMBT 41638M001	Brasil	SOAM	RBMC/TIGA
Aguascalientes	INEG 40507M001	México	NOAM	IGS/RGNA
Iquique	IQQE 41708S002	Chile	SOAM	IGS
EasterIsland	ISPA 41703M007	Chile	NAZC	IGS05
Lihuel Calel	LHCL 41518S001	Argentina	SOAM	RAMSAC
La Paz	LPAZ 40521M001	México	PCFC	RGNA
Marabá	MABA 41642M001	Brasil	SOAM	RBMC
Macapá	MAPA 41629M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Fort Davis	MDO1 40442M012	EUA	NOAM	IGS05
Mercedes	MECO 41526M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Inconfidentes	MGIN 41647M001	Brasil	SOAM	RBMC
Montes Claros	MGMC 41624M002	Brasil	SOAM	RBMC
Uberlândia	MGUB 41652M001	Brasil	SOAM	RBMC
Campo Grande	MSCG 41649M001	Brasil	SOAM	RBMC
Barra do Garças	MTBA 41663M001	Brasil	SOAM	RBMC
São Felix do Araguaia	MTSF 41655M001	Brasil	SOAM	RBMC
Santa Rosa	MZAE 41530M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
San Rafael	MZAS 41528M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Nassau	NAS0 43607S001	Bahamas	NOAM	-
Rio de Janeiro	ONRJ 41635M001	Brasil	SOAM	RBMC/RIBaC
Punta Arenas	PARC 41716S001	Chile	SOAM	IGS
Campina Grande	PBCG 41656M001	Brasil	SOAM	RBMC
Petrolina	PEPE 41650M001	Brasil	SOAM	RBMC
Pie Town	PIE1 40456M001	USA	NOAM	IGS05
Paramaribo	PMB1 43702S001	Suriname	SOAM	-
São Paulo	POLI 41630M001	Brasil	SOAM	RBMC
Popayan	POPA 41924S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Porto Velho	POVE 41628M001	Brasil	SOAM	IGS/RBMC/RIBaC
Portoviejo	PTEC 42008M001	Equador	SOAM	REGME
Rio Grande	RIO2 41507M006	Argentina	SOAM	IGS/RAMSAC
Rio Branco	RIOB 41645M001	Brasil	SOAM	RBMC
Riobamba	RIOP 42006M001	Equador	SOAM	IGS
Campos dos Goytacazes	RJCG 41657M001	Brasil	SOAM	RBMC
Guajara-Mirim	ROGM 41651M001	Brasil	SOAM	RBMC
Ji-Paraná	ROJI 41658M001	Brasil	SOAM	RBMC
Quito	S061 42003S003	Equador	SOAM	-
São Gabriel da Cachoeira	SAGA 41639M001	Brasil	SOAM	RBMC
São Luís	SALU 41640M001	Brasil	SOAM	IGS/RBMC

Santa Marta	SAMA 41928S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Salvador	SAVO 41643M001	Brasil	SOAM	IGS/RBMC/RIBaC
Chapecó	SCCH 41659M001	Brasil	SOAM	RBMC
Lages	SCLA 41660M001	Brasil	SOAM	RBMC
Santa Rosa	SRLP 41532M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Nieuw Nickerie	SRNW 43703M001	Suriname	SOAM	-
Paramatibo	SRZN 43701S005	Suriname	SOAM	-
Salvador Capitania	SSA1 41644M001	Brasil	SOAM	RBMC/TIGA
San Salvador	SSIA 41401S001	El Salvador	NOAM	IGS
Gurupi	TOGU 41661M001	Brasil	SOAM	RBMC
Palmas	TOPL 41648M001	Brasil	SOAM	RBMC
Tucuman	TUCU 41520S001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Cordoba	UCOR 41502M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
Curitiba	UFPR 41610M002	Brasil	SOAM	IGS/RBMC
Guanajuato	UGTO 40528M001	México	NOAM	RGNA
San Juan	UNSJ 41527M001	Argentina	SOAM	RAMSAC
San Luis Potosi	USLP 40530M001	México	NOAM	RGNA
Montevideo	UYMO 42301M001	Uruguai	SOAM	RGNA-ROU
Santa Teresa National Park	UYRO 42303M001	Uruguai	SOAM	RGNA-ROU
Tacuarembó	UYTA 42302M001	Uruguai	SOAM	RGNA-ROU
Valparaíso	VALP 41712S001	Chile	SOAM	IGS
Villavicencio	VIVI 41931S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Humaitá	AMHU 41646M001	Brasil	SOAM	RBMC
San Andres	ANDS 41908S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Los Angeles	ANTC 41713S001	Chile	SOAM	IGS
Ascension	ASC1 30602M001	United Kingdom	SOAM	IGS05
Barinas	BANS 42403M001	Venezuela	SOAM	REMOS
Cartagena	CART 41902M001	Colômbia	CARB	MAGNA-ECO/TIGA
Cruzeiro do Sul	CRUZ 41641M001	Brasil	SOAM	RBMC
Cumana	CUM3 42404M001	Venezuela	SOAM	REMOS
La Dorada	DORA 41915S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Santa Elena	ELEN 40902S001	Guatemala	NOAM	-
Grand Turk	GTK0 43602S007	United Kingdom	NOAM	-
San Jose del Guavire	GUAV 41917S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Ibague	IBAG 41918S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Kingston	JAMA 42601S001	Jamaica	NOAM	IGS
Key West	KYW1 49852S001	USA	NOAM	-
Manzanillo	MANZ 40513S001	México	NOAM	IGS
Miami	MIA3 00000S001	USA	NOAM	-
Monteira	MOTE 41922S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Mar del Plata	MPLA 41521M001	Argentina	SOAM	RAMSAC/TIGA
Puerto Deseado	PDES 41524M001	Argentina	SOAM	RAMSAC/TIGA
Quibdo	QUIB 41926S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO
Saint Marteen	SMRT 43102S001	Saint Marteen	CARB	-
Tumaco	TUMA 41929S001	Colômbia	SOAM	MAGNA-ECO/TIGA

## ANEXO C – Coordenadas aproximadas das estações em SIRGAS2000.

Coordenadas em SIRGAS2000

LOCAL GEODETIC DATUM: ITRF2000		EPOCH: 2000-05-01		
NUM	STATION NAME	X (M)	Y (M)	Z (M)
1	AREQ 42202M005	1942826.1830	-5804070.3296	-1796894.2835
2	BELE 41622M001	4228139.0041	-4772752.0945	-155761.3243
3	BOGA 41901M002	1744517.3421	-6116051.5368	512580.8832
4	BOGT 41901M001	1744398.9939	-6116037.4746	512731.7047
5	BOMJ 41612M001	4510195.8005	-4268322.3359	-1453035.2351
6	BRAZ 41606M001	4115014.0519	-4550641.5525	-1741443.9584
7	BRFT 41602M002	4985393.4980	-3954993.4048	-428426.7136
8	BRMU 42501S004	2304703.4368	-4874817.1541	3395186.9118
9	BUCA 41911S001	1838191.2649	-6057527.6675	785312.1759
10	BUEN 41912S001	1430383.8270	-6200818.1526	428933.9535
11	CALI 41903S001	1483099.9117	-6193060.1715	373124.0304
12	CAM2 40514M001	-56581.3610	-6001449.5605	2151509.1162
13	CHET 40526M001	179584.7512	-6048080.6559	2010447.3152
14	CHIH 40525M001	-1552307.8260	-5382771.9523	3041779.7421
15	CHPI 41609M003	4164613.8560	-4162456.8750	-2445028.8044
16	COL2 40524M001	-1427005.6482	-5852976.0303	2089088.9209
17	CONZ 41719M002	1492007.5963	-4887910.7058	-3803639.9176
18	CORD 41511M001	2345503.8645	-4910842.8356	-3316365.3498
19	CRAT 41619M001	4888826.0047	-4017957.4542	-798308.9616
20	CROI 43201M001	2607771.2011	-5488076.6861	1932767.7676
21	CUIB 41603M001	3430711.3725	-5099641.5755	-1699432.8802
22	CULI 40523M001	-1730936.7347	-5528855.2461	2658865.5759
23	ETCG 40602M001	645208.2265	-6249842.1918	1100399.4111
24	FORT 41602M001	4985386.5644	-3954998.5942	-428426.3834
25	GLPS 42005M002	-33801.6198	-6377516.5140	-82154.4043
26	GUAT 40901S001	-56063.5929	-6174978.6587	1596665.2354
27	GVAL 41623M001	4490200.7785	-4036984.9465	-2048288.3397
28	HER2 40522M001	-1996003.9883	-5208674.5111	3082959.5273
29	IGM1 41505M003	2751804.0159	-4479879.2833	-3598922.5139
30	KOUR 97301M210	3839591.3017	-5059567.4947	579957.0185
31	LPGS 41510M001	2780102.9850	-4437418.9248	-3629404.5122
32	MANA 41201S001	407981.8238	-6222925.6917	1333528.9372
33	MARA 42402M001	1976117.1358	-5948895.1410	1173592.2062
34	MCLA 41624M001	4404519.5628	-4235798.4060	-1823409.1122
35	MEDE 41921S001	1579608.4100	-6142783.8371	684352.2700
36	MERI 40520M001	39480.7568	-5957733.0903	2269335.0803
37	MEXI 40519M001	-2312590.9413	-4853743.6414	3419740.4137
38	MTY2 40518M001	-1029483.4856	-5657637.2244	2750926.0705
39	MZAC 41503M001	1932262.6743	-5001226.5138	-3444667.8404
40	NEIA 41620M002	3875254.9602	-4292588.7211	-2681108.7217
41	NEVA 41923S001	1617259.9426	-6161575.1397	324674.6348
42	OAX2 40517M001	-713483.0567	-6058316.0784	1861594.6645
43	OHI2 66008M005	1525811.8861	-2432478.2319	-5676165.5947
44	PALM 66005M002	1192671.9198	-2450887.6251	-5747096.0261
45	PARA 41610M001	3763751.6326	-4365113.8218	-2724404.6417
46	PERA 41905S001	1571418.6520	-6160208.4030	529446.3850
47	POAL 41616M001	3467519.3935	-4300378.5537	-3177517.6783
48	PSTO 41925S001	1404951.7018	-6222655.0897	134028.5714
49	PUR3 82001S003	2358177.8873	-5573619.6342	2007083.9232
50	RECF 41617M001	5176588.6123	-3618162.1603	-887363.8605
51	RIOD 41608M001	4280294.8622	-4034431.2457	-2458141.3254
52	RIOG 41507M004	1429907.7873	-3495354.8287	-5122698.6400
53	RIOH 41927S001	1841100.9849	-5973351.3336	1264686.5167
54	RWSN 41513M001	1956973.4162	-4217335.3120	-4351745.4915
55	SALV 41618M001	4863495.7032	-3870312.3666	-1426347.7597
56	SANT 41705M003	1769693.5213	-5044574.1572	-3468320.9307
57	SCUB 40701M001	1474538.0610	-5811243.2584	2168958.7898
58	SMAR 41621M001	3280748.3918	-4468909.7624	-3143408.6349
59	TAMP 40516M001	-807922.6636	-5849358.2375	2402967.6362
60	TOL2 40515M001	-1009229.1888	-5939511.4231	2094889.1940

61	TUNA	41930S001	1818373.1434	-6085596.9084	610964.9699
62	UBAT	41627M001	4129567.6586	-4146742.9583	-2527616.4408
63	UBER	41625M001	4014997.2007	-4509022.4378	-2052040.6441
64	UNRO	41525M001	2627448.1754	-4668383.1735	-3450213.4994
65	UNSA	41514M001	2412830.4152	-5271936.7164	-2652209.0332
66	VALL	41906S001	1807579.7075	-6006678.3254	1151876.7684
67	VARG	41626M001	4165518.2693	-4229235.8004	-2327739.5995
68	VBCA	41512M001	2319240.8037	-4411743.9330	-3966484.1165
69	VESL	66009M001	2009329.7867	-99741.4947	-6033158.4063
70	VICO	41613M001	4373283.2967	-4059639.0670	-2246959.6719
71	VIL2	40527M001	-310300.6649	-6060324.0028	1957383.5649
72	YOPA	41932S001	1921562.3845	-6053497.5322	587652.0360
73	ILHA		3735306.4290	-4669666.4910	-2212269.5320
74	LINS		3833247.2810	-4525427.6190	-2340157.4390
75	OURI		3785720.2180	-4494897.6350	-2471710.5960
76	ROSA		3551520.4900	-4704836.1220	-2428155.7320
77	SJRP		3885706.9070	-4527123.9610	-2249400.1480
78	PPT2	41611M002	3687624.3670	-4620818.6830	-2386880.3820
79	IMPZ	41615M001	4289656.4410	-4680884.9440	-606347.3310
80	NAUS	41614M002	3179409.3760	-5519130.6730	-334110.1630
81	ALAR	41653M001	5043729.7167	-3753105.5962	-1072966.9497
82	APTO	41933S001	1460797.8579	-6147200.8197	868399.4757
83	ARCA	41909S001	2086018.6779	-5976299.5952	781400.5200
84	AUTF	41515S001	1360918.9189	-3420457.9657	-5191175.1899
85	AZUE	41301M001	1049978.1740	-6229340.6596	876934.2118
86	AZUL	41529M001	2566993.1379	-4424962.8269	-3796807.7459
87	BDOS	43401M001	3143382.2602	-5359714.8093	1434875.8457
88	BERR	41910S001	1703223.7037	-6104502.3436	716436.9522
89	BOAV	41636M001	3117452.2146	-5555487.8725	314480.8497
90	BQLA	41934S001	1636421.5433	-6043722.3593	1211155.2076
91	CBSB	80402M001	1060277.1635	-5912339.4105	2137708.3869
92	CEEU	41602M003	4985392.7525	-3954993.3244	-428437.8511
93	CEFE	41637M001	4562488.5024	-3871935.8495	-2200001.4670
94	CFAG	41517S001	2016584.9134	-5050165.6763	-3323308.7242
95	CIC1	40508M002	-2433177.2098	-4845044.7932	3348295.9333
96	COPO	41714S001	1907040.8387	-5337379.0449	-2916334.7728
97	CRCS	42401M001	2459721.8714	-5770508.9019	1155112.0730
98	CUCU	41904S001	1901228.7208	-6025504.3081	870700.5210
99	CUEC	42009M001	1215704.3372	-6255712.2113	-318818.9637
100	CULC	40529M001	-1733739.0079	-5528108.6024	2658500.5288
101	DAVI	41302M001	830823.7910	-6254882.4805	928363.0308
102	EXUO	43606M001	1427635.0627	-5672506.9188	2534091.7018
103	FLOR	41916S001	1585141.0945	-6175731.4702	179144.8793
104	FQNE	41936S001	1779063.7898	-6097672.8897	603896.7312
105	CGGT	80401M001	902661.6525	-5954125.6781	2093986.0157
106	GOJA	41654M001	3761502.4168	-4767353.0379	-1946325.8802
107	GOLD	40405S031	-2353614.3775	-4641385.3250	3676976.4193
108	GREO	43501S001	2961421.0727	-5486288.7634	1341394.3741
109	GYEC	42007M001	1118628.4274	-6274783.8521	-237610.2786
110	IGN1	41303M001	1144297.0964	-6195649.8393	989518.5512
111	IMBT	41638M001	3714771.5653	-4221851.1527	-2999473.8354
112	INEG	40507M001	-1260435.6784	-5788547.1581	2360340.0222
113	IQQE	41708S002	2034208.5595	-5629172.3379	-2196141.8230
114	ISPA	41703M007	-1881703.4047	-5359979.8275	-2890599.2636
115	LHCL	41518S001	2079355.6340	-4582903.5145	-3905925.6434
116	LPAZ	40521M001	-2022283.4867	-5461274.1634	2592317.1579
117	MABA	41642M001	4156055.6576	-4801656.5637	-592100.5472
118	MAPA	41629M001	4005461.1503	-4963550.3610	5162.3495
119	MDO1	40442M012	-1329998.8158	-5328393.3842	3236504.1375
120	MECO	41526M001	2946968.5906	-4730057.0225	-3091864.9822
121	MGIN	41647M001	4076879.9639	-4270390.9832	-2407418.0271
122	MGMC	41624M002	4406284.9553	-4234092.8861	-1822973.7111
123	MGUB	41652M001	4019130.6260	-4504012.6094	-2055168.6971
124	MSCG	41649M001	3468912.0862	-4870550.4843	-2213735.4241
125	MTBA	41663M001	3755485.2843	-4852853.5707	-1735109.1560
126	MTSF	41655M001	3960733.8500	-4832787.7768	-1276215.0690
127	MZAE	41530M001	1987261.2730	-4955975.7551	-3477976.9521
128	MZAS	41528M001	1940230.2128	-4884145.4681	-3603203.6891

129	NASO	43607S001	1255070.7939	-5643661.8911	2684338.9813
130	ONRJ	41635M001	4283638.3728	-4026028.8876	-2466096.7328
131	PARC	41716S001	1255992.4804	-3622975.1749	-5079719.2340
132	PBCG	41656M001	5125899.4154	-3711505.6724	-795650.5036
133	PEPE	41650M001	4785329.9498	-4087942.5317	-1033193.8966
134	PIEL	40456M001	-1640916.9497	-5014781.2169	3575447.0765
135	PMB1	43702S001	3626394.1604	-5206998.1776	643353.1538
136	POLI	41630M001	4010099.5316	-4259927.3767	-2533538.6975
137	POPA	41924S001	1477067.4576	-6200659.1252	270141.3327
138	POVE	41628M001	2774265.6249	-5662060.1854	-959415.8850
139	PTEC	42008M001	1055320.7989	-6289193.9941	-116986.5070
140	RIO2	41507M006	1429907.8267	-3495354.8688	-5122698.6088
141	RIOB	41645M001	2373576.7911	-5817088.4186	-1096515.6601
142	RIOP	42006M001	1255144.9736	-6253609.4741	-182569.8139
143	RJCG	41657M001	4450354.2633	-3913332.8426	-2350256.2774
144	ROGM	41651M001	2615472.4461	-5694455.9447	-1185599.8242
145	ROJI	41658M001	2945010.5779	-5529377.0610	-1194259.2169
146	S061	42003S003	1272867.3569	-6252772.1426	-23801.7250
147	SAGA	41639M001	2486243.7671	-5873685.3607	-15906.7166
148	SALU	41640M001	4566947.9039	-4443098.5446	-286674.6941
149	SAMA	41928S001	1704996.2192	-6020152.3360	1233459.2307
150	SAVO	41643M001	4870283.7681	-3864605.3361	-1418872.5139
151	SCCH	41659M001	3450305.4498	-4512731.7227	-2892128.1607
152	SCLA	41660M001	3606986.0624	-4345293.2984	-2956654.1052
153	SRLP	41532M001	2224229.7475	-4617565.9674	-3783897.7253
154	SRNW	43703M001	3455962.4947	-5320074.9198	656216.0816
155	SRZN	43701S005	3623419.9934	-5214015.4843	602359.2372
156	SSA1	41644M001	4863840.3321	-3871158.6603	-1422726.6790
157	SSIA	41401S001	95567.0295	-6197785.6029	1500590.5630
158	TOGU	41661M001	4093503.2619	-4717194.8854	-1290037.7423
159	TOPL	41648M001	4174345.6270	-4690236.7613	-1118921.3181
160	TUCU	41520S001	2386117.2033	-5171223.3275	-2862949.0760
161	UCOR	41502M001	2371430.0627	-4904120.0073	-3307377.4129
162	UFPR	41610M002	3763751.6842	-4365113.8880	-2724404.6092
163	UGTO	40528M001	-1164730.1545	-5843944.6978	2272414.2279
164	UNSJ	41527M001	1987485.0627	-5065493.3772	-3317557.4597
165	USLP	40530M001	-1129695.0711	-5803303.9200	2389926.9859
166	UYMO	42301M001	2909133.0302	-4355451.3420	-3627801.1839
167	UYRO	42303M001	3144469.6719	-4258022.1255	-3546571.9347
168	UYTA	42302M001	3042868.2014	-4500645.4968	-3330675.3563
169	VALP	41712S001	1687310.4030	-5079964.5514	-3456509.2640
170	VIVI	41931S001	1798110.7383	-6103160.6886	450209.6112
171	AMHU	41646M001	2868209.9700	-5636111.8470	-827352.9210
172	ANDS	41908S001	898664.0200	-6160668.0840	1380782.8650
173	ANTC	41713S001	1608539.0000	-4816370.0000	-3847799.0000
174	ASCI	30602M001	6118526.0690	-1572344.7590	-876451.0446
175	BANS	42403M001	2132376.3160	-5935471.2570	948857.2430
176	CART	41902M001	1567348.5600	-6075293.5100	1142850.8000
177	CRUZ	41641M001	1883105.4590	-6035606.2550	-839206.3210
178	CUM3	42404M001	2730899.4000	-5647886.2000	1146938.6000
179	DORA	41915S001	1679425.1540	-6123536.8960	602182.1380
180	ELEN	40902S001	14103.8500	-6103995.0120	1843981.7370
181	GTKO	43602S007	1919592.6564	-5620954.8254	2316056.8174
182	GUAV	41917S001	1901004.6090	-6081791.3370	284450.7820
183	IBAG	41918S001	1623166.6120	-6149837.6680	489244.0390
184	JAMA	42601S001	1388059.8140	-5909149.0760	1951963.7910
185	KYW1	49852S001	842464.5120	-5741928.9990	2637061.4850
186	MANZ	40513S001	-1489331.0000	-5843668.0000	2070028.0000
187	MIA3	00000S001	982510.3580	-5664647.1850	2752419.6210
188	MOTE	41922S001	1539876.8920	-6112744.5660	968435.2620
189	MPLA	41521M001	2700316.8323	-4243736.7234	-3908569.7329
190	PDES	41524M001	1753203.6680	-3922031.1234	-4698513.5162
191	QUIB	41926S001	1464760.3810	-6175537.2450	629220.8030
192	SMRT	43102S001	2743826.0652	-5410452.1804	1962822.9351
193	TUMA	41929S001	1245830.1658	-6252039.9043	201465.8263

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)