

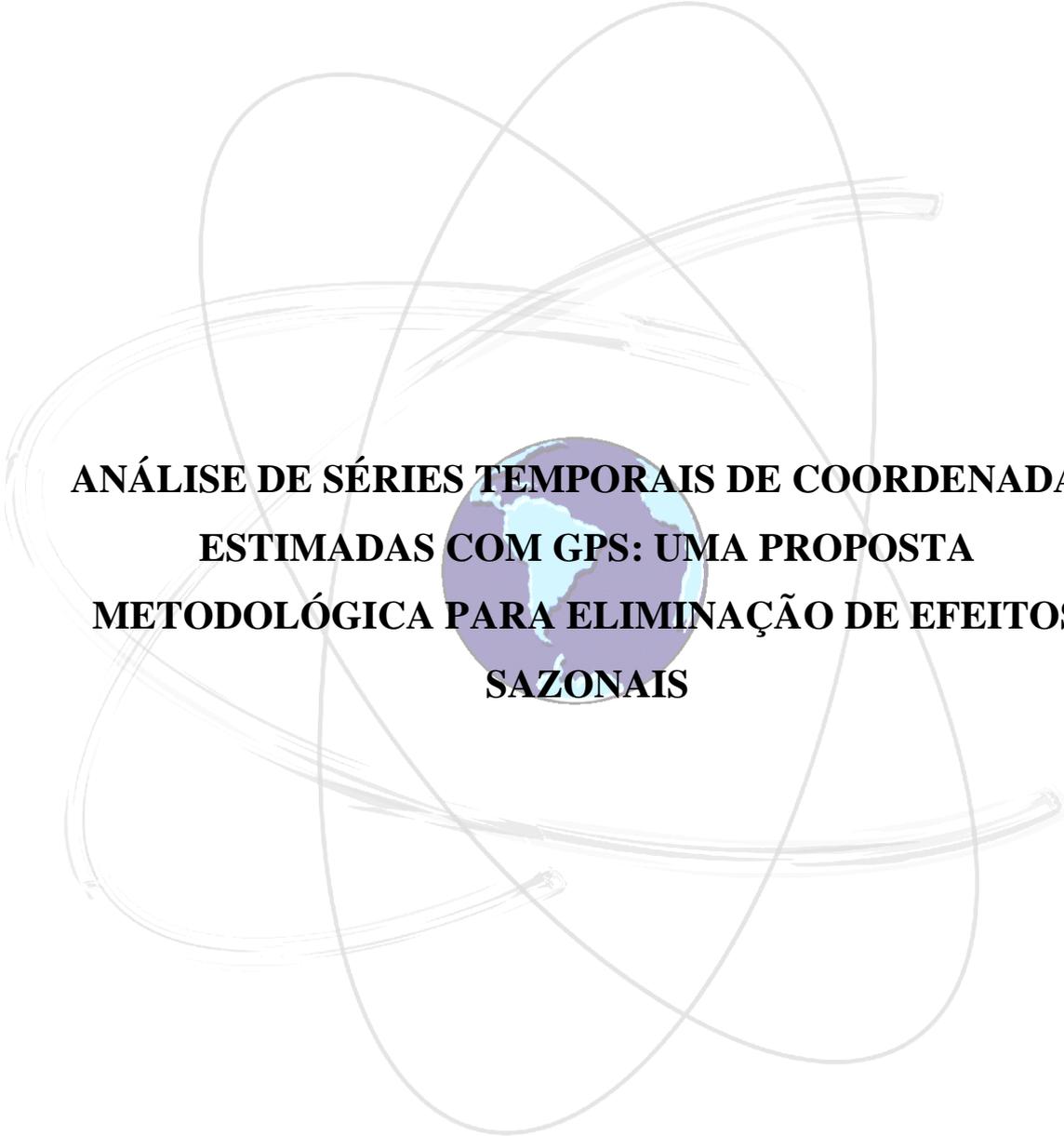


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

GUILHERME POLESZUK DOS SANTOS ROSA

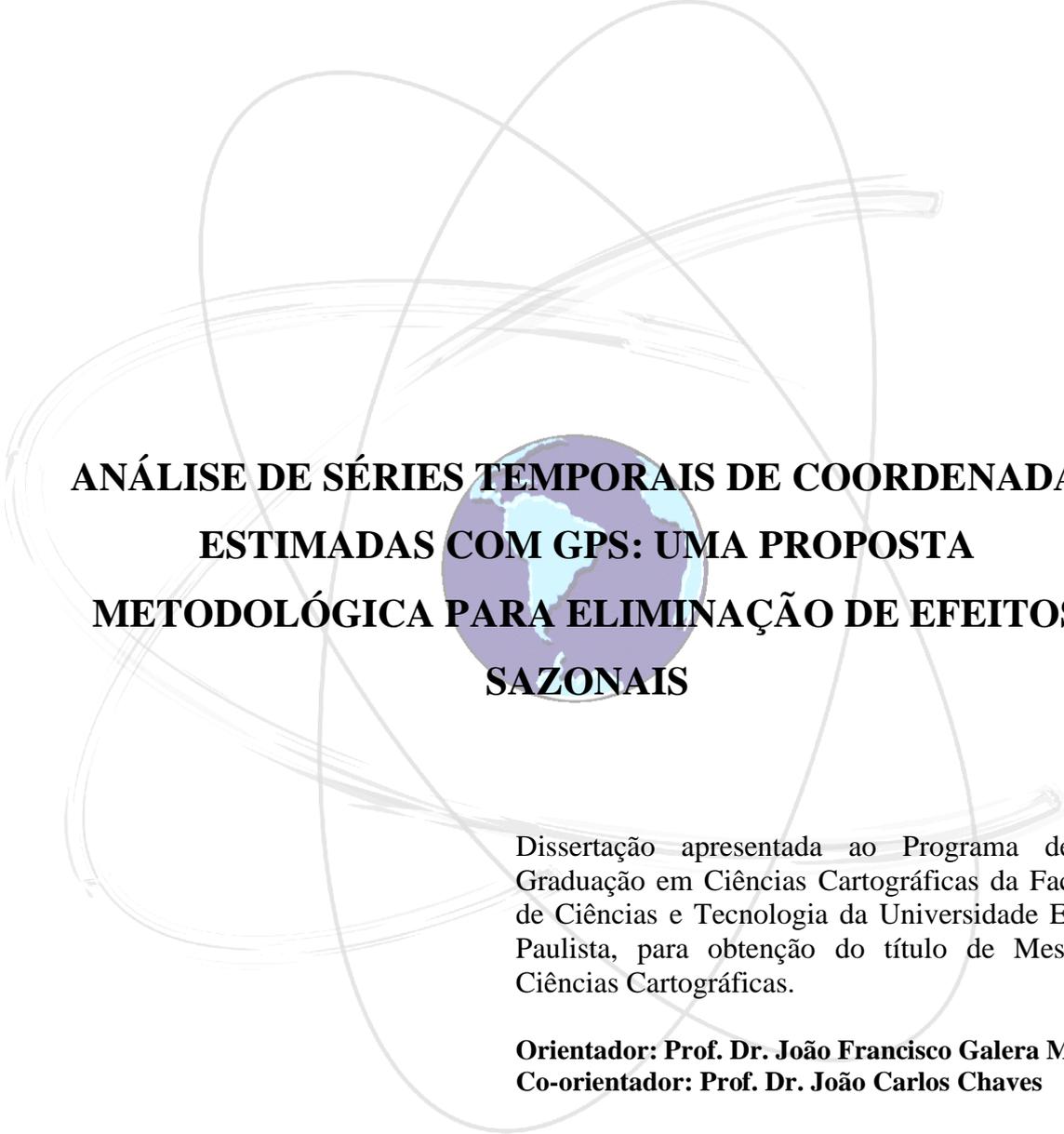
A large, light gray graphic in the background consists of several overlapping, hand-drawn style elliptical orbits. In the center of these orbits is a small globe of the Earth, showing the continents in light blue and the oceans in a darker blue. The globe is positioned behind the title text.

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS
ESTIMADAS COM GPS: UMA PROPOSTA
METODOLÓGICA PARA ELIMINAÇÃO DE EFEITOS
SAZONAIS**

Presidente Prudente

2008

GUILHERME POLESZUK DOS SANTOS ROSA



**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS
ESTIMADAS COM GPS: UMA PROPOSTA
METODOLÓGICA PARA ELIMINAÇÃO DE EFEITOS
SAZONAIS**

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 Francisco Galera Monico
Co-orientador: Prof. Dr. João Carlos Chaves

Presidente Prudente

2008

Rosa, Guilherme Poleszuk dos Santos.
R694a Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS
: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais /
Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa. - Presidente Prudente : [s.n],
2008
106 f. : il.

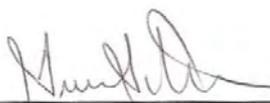
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Orientador: João Francisco Galera Monico
Banca: Marcelo Tomio Matsuoka, Ailton Pagamisse
Inclui bibliografia

1. Posicionamento GPS. 2. Series temporais de coordenadas. 3.
Wavelets e filtragem por MMQ. I. Autor. II. Título. III. Presidente
Prudente - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

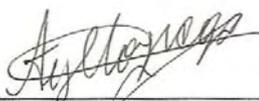
CDD(18.ed.) 623.71

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

BANCA EXAMINADORA



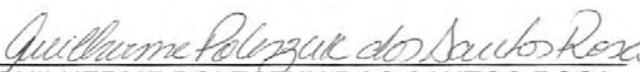
Prof. Dr. JOAO FRANCISCO GALERA MONICO
(Orientador)



Prof. Dr. AYLTON PAGAMISSE
(FCT/UNESP)



Prof. Dr. MARCELO TOMIO MATSUOKA
(UFRGS/RS)


GUILHERME POLESZUK DOS SANTOS ROSA

Presidente Prudente (SP), 31 de outubro de 2008.

Resultado: APROVADO

DADOS CURRICULARES

Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa

NASCIMENTO: 29 de Janeiro de 1982 - Presidente Prudente – SP

FILIAÇÃO: Carlos dos Santos Rosa
Rute Poleszuk dos Santos Rosa

2000-2005: Curso de Graduação
Bacharelado em Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciência e Tecnologia - UNESP

2006-2008: Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus valiosos pais,
Carlos e Rute, pelo empenho e carinho em todos
esses anos de minha vida. Por tê-los ao meu lado,
sempre presentes quando por alguns momentos
difíceis passei.*

*Aos meus irmãos Heloisa e William, pelo
exemplo de esforço e dedicação em fazer o melhor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para continuar o trabalho a mim confiado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Francisco Galera Monico (Prof. Galera), pela competência em ser orientador, pesquisador e professor, que busca além do ensino, o desenvolver da capacidade de pensar de seus alunos.

Ao Prof. Dr. João Carlos Chaves pela co-orientação.

Ao Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) que tem permitido seus membros discutirem o conhecimento desenvolvido durante suas pesquisas.

Ao Dr. Luiz Fernando Sapucci, pelo apoio prestado durante esta pesquisa e à Dr^a Eniuce Menezes de Souza que valiosamente contribuiu com sugestões na finalização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Cartografia, em especial àqueles do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), pela formação.

Aos colegas da sala de permanência do PPGCC, um especial agradecimento à Dr^a Daniele Barrocá pelas sugestões e apoio prestados. Claudinei e William Dal Poz pelas discussões ionosféricas de importante valor. Luiz Fernando Dalbelo e Wesley Polezel, exemplos de meninos de empenho. Guilherme H. Barros que, juntamente com João Paulo Magna trabalharam para o bem estar de todos da sala de permanência. Ao Haroldo e Heloisa, uma dupla que tem um potencial de absorção de conhecimento e tudo transforma em *software*. À colega de pesquisa e laboratório Maria Ligia Chuerubim. Marcelo L. Holzschuh, nosso colega de iniciativas. Priscila Midori e Aline Ishikawa, trabalhadoras!! Ao Thiago Thiedtke pela ajuda nas dificuldades no LGE com os sistemas Linux. Wimmerson, pelo exemplo de dedicação e eficiência.

Também aos colegas da sala de permanência que não cito, mas em especial a todos aqueles a quem tive o privilégio de auxiliar com os quais também muito aprendi.

Aos funcionários da FCT/UNESP que, mesmo nos bastidores, contribuíram.

Agradeço também ao IBGE pela disponibilização dos dados e ao Natural Resources Canada (NRCAN) pela concessão de uso do software NRCAN Precise Point Positioning.

À CAPES pelo apoio financeiro durante os dois anos de pós-graduação como também ao CNPq nos últimos meses necessários para finalização desta pesquisa.

EPÍGRAFE

“Onde não há conselho, frustram-se os projetos; mas com a multidão de conselheiros se estabelecem.” Provérbios 15:22

*“Science is organized knowledge.
Wisdom is organized life.”
(Immanuel Kant)*

RESUMO

As redes ativas GPS tem se tornando cada vez mais utilizadas nos levantamentos geodésicos. As estações que fazem parte dessas redes têm suas coordenadas determinadas com alta precisão que, devido à estabilidade na sua construção e disponibilidade de dados, são chamadas estações de referência. Os dados podem ser empregados numa diversidade de pesquisas e projetos, sendo um dos mais comuns atualmente os de levantamentos geodésicos. O estudo e monitoramento do vapor d'água na atmosfera e movimento de placas litosféricas são exemplos de aplicações. Dentre os métodos de posicionamento GPS, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) vem apresentando resultados muito promissores. Uma característica do PPP está relacionada com a modelagem e/ou estimação de todos os erros envolvidos nesse método. A acurácia obtida para as coordenadas pode ser da ordem de poucos milímetros, tal como no método de posicionamento relativo. Efeitos sazonais podem afetar esta acurácia caso não sejam considerados. Desta forma, é desejável dispor do conhecimento de todos os fatores sazonais (movimento do pólo, marés terrestres e cargas oceânicas) que interferem na posição da estação, visando minimizá-los ou modelá-los. Contudo, há evidências da existência de outros efeitos dessa natureza ainda não levados em consideração no PPP. Nesta pesquisa, foram realizados alguns experimentos com a finalidade de investigar os efeitos sazonais presentes nas séries temporais das coordenadas das estações Brasília (BRAZ), Euzébio (BRFT) e Manaus (NAUS) pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). As coordenadas dessas estações foram estimativas diariamente com o PPP e analisadas por meio de wavelets para identificação dos períodos dos efeitos sazonais anual e semi-anual presentes nas suas séries temporais. Posteriormente, as séries foram filtradas desses efeitos usando um ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) de uma função periódica. Os resultados obtidos mostraram que a combinação dessas ferramentas matemáticas, wavelets e MMQ, é uma técnica interessante para remoção de efeitos sazonais em séries temporais.

palavras-chave: Redes Ativas GPS · Efeitos sazonais · Posicionamento por Ponto Preciso · Método dos Mínimos Quadrados · Wavelets

ABSTRACT

The active GPS networks have being more and more used in the geodetic surveying. The stations that belong to these networks have the coordinates determined with high precision, due to the construction stability and data availability, so they are called reference stations. The reference station data can be employed in a diversity of researches, where the geodetic positioning is one of the most common. The study and monitoring of the water vapor in the atmosphere and the lithosphere plates movement are examples of applications. Among the existent methods of GPS positioning, the Precise Point Positioning (PPP) has been presented great results. The accuracy obtained for the coordinates can reaches few millimeters, such as in the relative positioning. An important aspect concerning PPP is related to the modeling and / or estimation of all errors that affect this method. Among the errors, the seasonal effects can affect PPP accuracy if they are not considered. In this way, it is desirable to take care of all the seasonal factors (polar motion, solid tides and ocean loading) that interfere in the station position, aiming to minimize or to model them. Besides, there are evidences of other seasonal effects that still remain in PPP. In this research, some experiments were carried out with the finality of investigating the seasonal effects in the coordinate time series of the stations Brasília (BRAZ), Euzébio (BRFT) and Manaus (NAUS), that belong to the *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo* (RBMC). The coordinates of these stations were estimated daily using the PPP. The time series were analyzed applying wavelets, with the goal of identifying the annual and semi-annual periods presented in the series. Subsequently, the series were filtered of these effects using the Least Squares Method (LSQ) in order to adjust a periodic function and remove the effect. The obtained results showed that the combination of these mathematical tools, wavelets and LSQ, is an interesting technique for removal the seasonal effects in time series.

keywords: Active GPS networks · seasonal effects · Precise Point Positioning · Least Square Adjustment · Wavelets

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Antena choke-ring - estrutura mecânica do modelo AR-25.....	35
Figura 2 - Antena pinwheel - estrutura interna.....	35
Figura 3 - Movimento do pólo decomposto em suas componentes cíclicas.....	37
Figura 4 - Vetores velocidade para as estações pertencentes ao IGS.....	39
Figura 5 - Deslocamentos da estação PPTE devido às marés terrestres.....	41
Figura 6 - Efeito de marés oceânicas calculado a partir dos coeficientes obtidos para a estação PPTE	42
Figura 7 - Variação anual das correções de marés oceânicas calculadas para os 366 dias de 2008 para a estação PPTE.....	43
Figura 8 - Variação anual para a estação Fortaleza (BRFT).....	43
Figura 9 - Geometria do centro de fase de uma antena GPS (AKROUR, 2005).....	46
Figura 10 - Superfície formada pela variação do centro de fase (L1) da antena LEIAX1202.....	47
Figura 11 - BRFT: Eixo principal, erro do relógio do receptor e reta ajustada. Eixo secundário, erro sem a tendência linear e desvio padrão. Receptor GNSS Leica modelo GRX 1200 Pro	49
Figura 12 - PPTE: Eixo principal, erro do relógio do receptor. Eixo secundário, desvio padrão. Receptor GPS Trimble modelo NetRS	49
Figura 13 - Série de discrepâncias da coordenada Up do sistema local para a estação NAUS.....	52
Figura 14 - Série não estacionária, mas homogênea.....	55
Figura 15 - <i>Wavelets</i> base de Morlet	60
Figura 16 - Localização das estações utilizadas nos experimentos. O clima predominante e a hidrografia do país	65
Figura 17 – Distribuição das placas litosféricas.....	66
Figura 18 - Componente Leste	74
Figura 19 - Componente Norte.....	74
Figura 20 - Componente Vertical.....	74
Figura 21 - Espectro de <i>wavelets</i> para a componente Vertical	75
Figura 22 – Série temporal da componente Vertical e curva ajustada.....	75
Figura 23 - Espectro de <i>wavelets</i> para a componente Vertical com efeito anual removido.....	76
Figura 24 - Componente Vertical com efeitos anual e semi-anual removidos.....	76
Figura 25 - Espectro de <i>wavelets</i> para a componente Vertical sem os efeitos anual e semi-anual.....	77
Figura 26 – Medidas realizadas pelo limnógrafo na região de Manaus (Estação MANAUS)	78
Figura 27 - Componente Norte e curva ajustada.....	79
Figura 28 – Espectro de <i>wavelets</i> para a série da componente Norte corrigida dos efeitos anual e semi- anual.....	79
Figura 29 – Componente Leste e curva ajustada. Efeitos anuais e semi-anuais removidos.....	80
Figura 30 – Espectro de <i>wavelets</i> para a componente Leste	80
Figura 31 – Espectro de <i>wavelets</i> para a componente leste removido os efeitos anual e semianual	80
Figura 32 – Componente Leste.....	82

Figura 33 – Componente Norte	82
Figura 34 – Componente Vertical	82
Figura 35 – Espectro de <i>wavelets</i> para a componente Vertical.....	83
Figura 36 – Componente Vertical com efeito anual removido	83
Figura 37 - Manchas solares.....	84
Figura 38 – Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Norte.....	85
Figura 39 – Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Norte com o efeito anual removido.....	85
Figura 40 – Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Leste	86
Figura 41 – Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente após a remoção do efeito anual	86
Figura 42 – Componente Leste.....	87
Figura 43 – Componente Norte	88
Figura 44 – <i>Componente Vertical</i>	88
Figura 45 – Espectro de <i>wavelets</i> para a componente vertical.....	89
Figura 46 – Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Vertical com o efeito anual removido.....	89
Figura 47 – Série temporal resultante da diferença entre a série Vertical obtida a partir dos dados não corrigidos e corrigidos dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera.....	90
Figura 48 – Espectro de <i>wavelets</i> para a diferença entre as séries temporais da componente Vertical corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera.....	91
Figura 49 - Espectro de <i>wavelets</i> para a diferença entre as séries temporais da componente Norte corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera	91
Figura 50 – Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Leste	92
Figura 51 - Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Leste após a remoção do efeito anual.....	92
Figura 52 - Espectro de <i>wavelets</i> e potência para a componente Leste	93
Figura 53 - Espectro de <i>wavelets</i> para a diferença entre as séries temporais da componente Leste corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes de erros presentes no posicionamento por GPS.....	25
Tabela 2 - Qualidade das efemérides precisas e erros dos relógios dos satélites produzidos pelo IGS	27
Tabela 3 - Coeficientes da <i>ion-free</i>	31
Tabela 4 - Principais fontes de erros e modelos para correção (adotados no processamento)	67
Tabela 5 - Exemplo de arquivo de controle utilizado pelo <i>software</i> GPSPPP	69
Tabela 6 - Exemplo de saída do <i>software</i> GPSPPP	69
Tabela 7 - Descrição dos arquivos utilizados e gerados no processamento	70
Tabela 8 – Informações da estação NAUS.....	73
Tabela 9 - Fator de variância a posteriori para cada etapa de remoção de efeitos na série temporal	77
Tabela 10 – Informações gerais da estação BRAZ	81
Tabela 11 – Informações técnicas relacionadas à estação BRFT	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANTEX	Antenna Exchange Format
ARP	Antenna Reference Point
CA	Coarse Acquisition
CIO	Centro Integrador de Órbitas
COSMOS	Continuous Strain Monitoring Observation System
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTP	Conventional Terrestrial Pole
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FFT	Fast Fourier Transformation
GIPSY-OASIS	GPS-Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis Simulation Software
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRAPES	GPS Regional Array for Precise Surveying and Physical Earth Science
GSD	Geodetic Survey Division
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems
IGS	International GNSS Service
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IWV	Integrated Water Vapor
LGE	Laboratório de Geodésia Espacial
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NNR-NUVEL	No Net Rotation - Northern University Velocity Model
NRCan	Natural Resources Canada
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PCV	Phase Center Variation
PNT	Previsão Numérica de Tempo (Numerical Weather Prediction)
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	Posicionamento por Ponto Simples
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RHCP	Right Hand Circularly Polarized
SA	Selective Availability
SPS	Standard Positioning Service
TEC	Total Electron Content
TEQC	Translation, Editing and Quality Check
USNO	United States Naval Observatory
ZWD	Zenithal Wet Delay

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Contextualização da pesquisa.....	16
1.2 Objetivos.....	20
1.3 Justificativa.....	20
1.4 Conteúdo da dissertação.....	21
2 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO.....	22
2.1 O conceito de posicionamento por ponto.....	22
2.1.1 Posicionamento por ponto simples.....	22
2.1.2 Posicionamento por ponto preciso.....	23
2.2 Modelos matemáticos envolvidos no PPP.....	24
2.3 Erros envolvidos no PPP.....	25
2.3.1 Erros orbitais.....	27
2.3.2 Erro do relógio do satélite.....	28
2.3.3 Atrasos no hardware do satélite.....	28
2.3.4 Antena do satélite.....	29
2.3.5 Relatividade.....	29
2.3.6 Ionosfera.....	30
2.3.7 Troposfera.....	32
2.3.8 Perda de ciclos.....	33
2.3.9 Efeito do multicaminho.....	34
2.3.10 Rotação da Terra.....	35
2.3.11 Movimento do pólo.....	36
2.3.12 Cargas sobre a crosta.....	38
2.3.13 Movimento da crosta.....	38
2.3.14 Marés terrestres.....	39
2.3.15 Carga de marés oceânicas.....	41
2.3.16 Carga da atmosfera.....	44
2.3.17 Rotação de fase (phase Wind-up ou Wrap-up).....	44
2.3.18 Centro de fase da antena do receptor.....	45
2.3.19 Erro do relógio do receptor.....	48
2.3.20 Atrasos no hardware do receptor.....	50
3 SÉRIES TEMPORAIS.....	51
3.1 Definição.....	51
3.2 Potencialidades da análise de séries temporais.....	53
3.3 Estacionariedade.....	54
3.4 Ferramentas para análise.....	55
3.4.1 Procedimento para obtenção da tendência.....	56
3.4.2 Procedimento para obtenção das componentes sazonais.....	56
3.4.3.1 Análise Espectral de Fourier ou harmônica.....	58
3.4.3.2 Análise de séries temporais usando <i>wavelets</i>	59
3.5 Remoção de efeitos de tendência e sazonalidade utilizando o ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados.....	60
3.5.1 Modelo matemático.....	61
3.5.2 Ajustamento das observações: filtragem de sinal.....	62
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.1 Materiais.....	64
4.2 Metodologia proposta.....	66

4.3	Software de processamento de dados GPS	67
4.4	Processamento dos dados	68
4.5	Análise das séries temporais.....	72
5	EXPERIMENTOS E ANÁLISES	73
5.1	Estação Manaus (NAUS).....	73
5.1.1	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Vertical	74
5.1.2	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Norte	78
5.1.3	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Leste	79
5.2	Estação Brasília (BRAZ).....	81
5.2.1	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Vertical	83
5.2.2	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Norte	84
5.2.3	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Leste	85
5.3	Estação Fortaleza (BRFT)	86
5.3.1	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Vertical	89
5.3.1.1	Remoção dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera da componente Vertical.....	90
5.3.2	Remoção dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera da componente Norte	91
5.3.3	Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Leste	91
5.3.3.1	Remoção dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera da componente Leste	92
5.4	Considerações finais	93
6	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A	106

1 INTRODUÇÃO

No estudo de fatores relacionados à rotação da Terra, movimento de placas litosféricas, deformações da crosta, por exemplo, o GPS (*Global Positioning System*) tem se tornado uma das mais importantes técnicas observacionais empregada atualmente (DING, 2005).

A litosfera é a camada da Terra onde é realizada a maioria das ações naturais e antrópicas. A dinâmica desta camada terrestre tem despertado a curiosidade humana em entender melhor os fatores que a regem, pois alguns desses interferem diretamente àqueles que sobre a mesma residem. Fatores como sismos e os grandes abalos são sempre um dos principais eventos rememorados relacionados à litosfera, devido à sua grande magnitude e por também afetar a vida das pessoas, algumas vezes de maneira catastrófica.

Além dos eventos sísmicos, a litosfera está em constante processo de renovação, fato que é apenas notado por alguns sistemas de monitoramento. Sabe-se que as placas litosféricas estão em constante movimento cuja velocidade, apesar de ser da ordem de cm/ano, é determinada com alta precisão. Essas placas não são rígidas e quando sujeitas a cargas respondem de maneira contrária à ação, afetando de forma direta todos os objetos fixos à crosta. Atualmente, o sistema GPS tem sido uma das tecnologias capaz de detectar esses efeitos (MONICO, 2007). Outros sistemas que fazem parte do GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) como o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema*) também poderão contribuir com essa tarefa de alguma forma, quer seja de maneira autônoma ou integrando suas observáveis com aquelas provenientes do GPS.

1.1 Contextualização da pesquisa

Dos sistemas de posicionamento global, o GPS é um dos principais sistemas de posicionamento empregado nas redes ativas, face à sua disponibilidade garantida pela constante manutenção por parte do sistema de controle. Relacionado às redes ativas, essas são compostas de estações onde há instalado pelo menos um receptor de sinais de um ou mais sistemas (GPS, GLONASS), que armazena e distribui os dados dos satélites rastreados (MAREL, 1998). Atualmente essas estações têm-se reduzido a apenas um receptor, pois muitos deles são construídos de maneira que hardware e um sistema operacional são

integrados, tornando o equipamento um sistema completo (GPS e computador) muito mais robusto. A maioria dos receptores, principalmente os que têm a finalidade de serem empregados em estações de referência, podem ser controlados à distância (remotamente), pois são diretamente conectados à internet reduzindo consideravelmente a infra-estrutura antes necessária. Já as estações centrais, responsáveis por esse controle, possuem recursos computacionais mais dedicados a tarefas de monitoramento de integridade, armazenamento e geração de diversos produtos e relatórios como mapas da troposfera e ionosfera, por exemplo. Também são responsáveis pela disseminação dos dados usando algum formato para isso. Atualmente, o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM¹ via Internet Protocol*) tem apresentado grandes possibilidades de uso para fins de posicionamento em tempo real, pois foi desenvolvido principalmente para transportar dados GNSS via internet.

O número de redes GNSS tem aumentado mundialmente, visando dar apoio a levantamentos geodésicos como também investigações científicas. Estão vinculadas a centros de pesquisa, mantidas com recursos públicos ou privados. Dessas redes, destaca-se a Rede IGS (*International GNSS Service*), de âmbito global, constituída atualmente por 385 estações GNSS espalhadas pelo globo (IGS, 2008). Os dados são utilizados para produzir as efemérides para os satélites, correções para o erro do relógio de cada satélite GNSS entre outros produtos. Já uma rede de abrangência nacional, pode-se citar a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), mantida pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Atualmente possui mais de 50 estações ativas espalhadas pelo território brasileiro que desempenham a função de apoio para levantamentos geodésicos e pesquisas científicas relacionadas (IBGE, 2008). Vale citar ainda no contexto de redes, a Rede GPS Ativa do oeste do estado de São Paulo, de âmbito regional, que faz parte de dois projetos financiados pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo). Tais projetos são conduzidos pela Faculdade de Ciências e Tecnologia / Universidade Estadual Paulista (FCT/UNESP) com a finalidade de dar apoio às atividades científicas que estão sendo desenvolvidas por essa instituição no que se refere ao GNSS (GEGE, 2008).

O número de estações em cada rede também tem aumentado devido a integração de pequenas redes. Isto tem sido uma realidade no Brasil, com a integração das estações da rede INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) à RBMC juntamente com a modernização dessa última. O investimento nesta área tem gerado muitas pesquisas, sendo que essas redes têm desempenhado funções importantes em investigações

¹ RTCM - acrônimo para *Radio Technical Commission for Maritime Services*

científicas. Dentre essas pesquisas vale citar, por exemplo, o monitoramento do vapor d'água e o conteúdo total de elétrons (TEC) na atmosfera. As estimativas do vapor d'água na troposfera podem ser assimiladas nos modelos de previsão numérica de tempo (PNT) melhorando significativamente os resultados. Detalhes podem ser encontrados em Sapucci (2001). Já a quantificação do TEC pode auxiliar no desenvolvimento de modelos para a ionosfera, úteis para usuários que dispõem de receptores simples frequência (MATSUOKA, 2003).

No contexto da Geofísica, estudos voltados à detecção de movimentos das placas litosféricas têm sido um dos assuntos que, com a colaboração de algumas áreas das Ciências Exatas e da Terra, procura investigar os fenômenos que ocorrem na crosta terrestre. O GPS é uma tecnologia que tem sido utilizada para muitos fins, sendo um deles o monitoramento da velocidade das placas litosféricas. A análise das séries temporais, obtidas do processamento dos dados coletados pelos receptores de uma rede ao longo de anos, torna possível detectar os movimentos relacionados à placa que contém essas estações, revelando efeitos de longo período que não são notados em séries diárias.

O comportamento das coordenadas das estações GPS espalhadas pelo globo tem sido constantemente investigado por alguns centros de pesquisa visando, por exemplo, a realização dos sistemas de referência. Desses centros, destaca-se o IGS, que consiste de mais de 200 agências que voluntariamente mantém as estações GPS/GLONASS espalhadas pela superfície terrestre em constante funcionamento. De maneira recíproca, o IGS fornece alguns importantes produtos, como as órbitas dos satélites, erros dos relógios, elementos de orientação da Terra etc., os quais são produtos de alta qualidade e indispensáveis para pesquisas científicas relacionadas ao GNSS. Além do IGS existem centros de menor porte. No Brasil, destaca-se o IBGE que tem desempenhado uma importante função como mantenedor da RBMC, possibilitando a realização de inúmeras pesquisas com os dados de suas estações. A análise das séries temporais das coordenadas das estações é uma delas, viável e necessária, cujo estudo tem grande importância no âmbito científico e técnico, pois essa rede é utilizada como referência nas atividades geodésicas que fazem uso dos dados GPS.

Atualmente, no que diz respeito ao processamento dos dados GPS, a maioria dos *softwares* científicos utilizados vem sendo atualizados com modelos mais recentes, o que tem proporcionado resultados cada vez mais precisos. A obtenção de séries temporais sejam elas de coordenadas, atraso troposférico, TEC entre outras variáveis, tem sido uma tarefa dos grandes centros de pesquisa, a fim de analisar o comportamento não apenas espacial, mas também acompanhar a evolução temporal de determinados fenômenos. Com a diversidade de

softwares científicos disponíveis atualmente, é possível obter resultados com excelente qualidade face à disponibilidade de uso de alguns para a comunidade científica. Pode-se citar os mais divulgados e utilizados no meio científico, como o BERNESE, GAMIT (*MIT GPS Analysis*), GIPSY-OASIS II (*GPS-Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis Simulation Software*) e NRCan-PPP (*Natural Resources Canadá – Precise Point Positioning*). Desses, os três últimos podem ser obtidos por instituições de pesquisa, por meio de uma concessão gratuita de uso. Nos dias atuais, com a facilidade da *internet*, a comunidade de usuários tem aumentado, já que alguns desses *softwares* já há algum tempo estão sendo disponibilizados na forma de serviços *online*, que requerem apenas o envio dos arquivos de observações GPS pelo usuário por meio de uma interface *web*. Destacam-se atualmente os serviços de *online* gratuitos, cujos procedimentos de uso de cada um deles pode ser consultado nos endereços que seguem:

- APPS (*Automatic Precise Positioning Service*) – Serviço mantido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), cujo software de processamento é o GIPSY-OASIS. Mais informações e acesso ao serviço podem ser encontradas em <http://apps.gdgps.net>;
- Auto-GIPSY – mantido pelo JPL e disponível em <http://milhouse.jpl.nasa.gov/ag>. Requer que os dados a serem processados estejam num servidor ftp anônimo;
- NRCan-PPP – desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division* (GSD) e mantido pelo NRCan. Disponível em http://www.geod.nrcan.gc.ca/online_data_e.php;
- GAPS (*GPS Analysis Positioning Software*) – O serviço pode ser atualmente acessado em <http://gaps.gge.unb.ca>;
- IBGE PPP – Acredita-se que seja o primeiro serviço de processamento de dados GPS *online* no Brasil e encontra-se disponível em <http://gps-ntrip.ibge.gov.br/apache2-default>. O *software* de processamento usado é aplicativo NRCan-PPP, desenvolvido pelo GSD-NRCan;
- AUSPOS – Disponível em <http://www.ga.gov.au/geodesy/sgc/wwwgps>.

Dos serviços *online* disponíveis hoje em dia, nota-se que a maioria emprega o PPP, um método que vem se tornando uma ferramenta para processamento de dados GNSS muito útil, já que requer pouco esforço computacional e apresenta bons resultados. Com a adoção de novos conceitos, considerados o estado da arte do posicionamento geodésico, espera-se que esses resultados sejam ainda mais acurados. Os modelos mais recentes têm representado cada vez melhor a realidade física, como por exemplo, a calibração absoluta de

antenas GNSS, que vem proporcionando benefícios no que diz respeito às estimativas dos parâmetros envolvidos nos processamentos de dados GNSS usando o PPP.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para análise de série temporais de coordenadas de estações estimadas a partir de dados GPS. Em uma abordagem mais específica, pretende-se verificar as influências sazonais presentes em longas séries de coordenadas.

Como objetivos específicos têm-se:

- Estimar as coordenadas diárias de algumas estações da RBMC ao longo dos anos utilizando o método PPP;
- Analisar as séries temporais das coordenadas investigando características com relação à tendência e a sazonalidade;
- Correlacionar os efeitos detectados em cada série com eventos conhecidos da natureza.

1.3 Justificativa

A maioria das estações de monitoramento contínuo atualmente disponibiliza seus dados ao público, geralmente de forma on-line. No Brasil, a RBMC mantida pelo IBGE, possui algumas estações com mais de dez anos de funcionamento. Estações como essas podem revelar influências causadas por eventos geofísicos de longo período, sazonais e/ou tendenciosos mediante análise das coordenadas advindas do processamento de seus dados. Quando esses erros não são considerados no processamento serão absorvidos pelos parâmetros do modelo funcional. Dependendo do método de processamento, somente os erros presentes nas observáveis GPS já contribuem cerca de alguns metros, afetando de maneira quase direta a posição estimada.

Um estudo mostrou que as estações de monitoramento contínuo estão sujeitas a fatores ambientais. A estação MANA (Manaus), instalada na bacia Amazônica apresentou uma variação de 70 mm de amplitude vertical, indicando uma alta correlação com as enchentes e vazantes do rio Amazonas. A carga hidrostática na região produz variações nas coordenadas cujos maiores efeitos são detectados na componente vertical (BEVIS et al,

2005). Este estudo mostra que as coordenadas das estações possuem além de uma tendência linear (velocidade), variações cíclicas (sazonais) que dependem diretamente do local em que a estação encontra-se instalada. Acredita-se que efeitos dessa natureza estejam presentes nas séries temporais das demais estações GPS da RBMC.

Os efeitos temporais nas coordenadas de estações vêm sendo pesquisados pela comunidade geodésica e tem auxiliado nos processamentos em que se objetiva alta precisão. Com o desenvolvimento de novos modelos surge o interesse em reprocessar os dados, adotando os conceitos mais atuais, envolvendo diversas áreas do conhecimento, levando em conta a evolução tecnológica, notável principalmente na Geodésia por satélites.

1.4 Conteúdo da dissertação

Este trabalho está dividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 trata de maneira concisa do assunto principal dessa pesquisa, bem como dos objetivos e justificativas.

O capítulo 2 aborda diversos aspectos relacionados ao PPP, tratando brevemente das observáveis e erros relacionados.

A análise dos resultados requer um conhecimento a respeito de séries temporais o qual se encontra desenvolvido no capítulo 3.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia aplicada na execução dos experimentos.

O capítulo 5 apresenta os experimentos realizados e a análise dos resultados.

No capítulo 6, algumas considerações finais são apresentadas.

2 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

Em uma análise crítica do primeiro capítulo de Parkinson (1996) nota-se que o sistema GPS, em sua concepção original, foi desenvolvido objetivando apenas o posicionamento por ponto simples, também chamado de posicionamento absoluto. A idéia de posicionamento relativo surgiu muito depois do lançamento dos primeiros satélites e até então tem sido um método dominante, por apresentar resultados muito bons, simplificando de maneira considerável os modelos, em razão da diferenciação das observações. Contudo, o PPP vem apresentando resultados muito bons devido à atual qualidade dos produtos envolvidos no processamento. O PPP tem a vantagem de revelar todos os erros presentes no posicionamento à custa de um longo período de coleta de dados. Além disso, utiliza modelos matemáticos bem mais sofisticados que aqueles utilizados no relativo.

Um conhecimento abrangente de todos os erros envolvidos, bem como sua detecção e eliminação, parcial ou total, são fatores determinantes que permitem analisar categoricamente os resultados obtidos dessa técnica autônoma de posicionamento.

2.1 O conceito de posicionamento por ponto

O posicionamento por ponto pode ser classificado em (MONICO, 2007):

- Posicionamento por ponto simples (PPS);
- Posicionamento por ponto preciso (PPP).

A diferença entre PPS e PPP está relacionada principalmente ao rigor adotado no processamento dos dados.

2.1.1 Posicionamento por ponto simples

O PPS é intensamente utilizado nos receptores destinados a obtenção de coordenadas expeditas, apenas com o uso do código C/A (*Coarse Acquisition*) modulado sobre a portadora L1. Atualmente, após a desativação da SA (*Selective Availability*), a precisão do PPS melhorou muito, passando da ordem de 100 metros para algo em torno de 12 metros com

apenas um instante de medida. Este serviço é denominado SPS (*Standard Positioning Service*) (MONICO, 2007)

Para a finalidade de navegação expedita, o SPS fornece bom desempenho, pois o usuário está interessado apenas em uma posição aproximada, quer seja para localização ou orientação. Para fins de posicionamento geodésico, esse serviço passa a não ser uma boa alternativa, pois muitos erros negligenciados no processamento são propagados quase que diretamente para as coordenadas. A precisão do PPS é degradada principalmente pelo atraso do sinal quando este se propaga pela ionosfera. Desta forma, mesmo que o receptor permaneça por muito tempo estático, não há melhoria considerável na precisão relacionada à posição obtida, já que os erros principais são de característica sistemática (MONICO, 2007).

2.1.2 Posicionamento por ponto preciso

O PPP é um dos métodos de posicionamento factíveis de serem realizados com o GNSS. Refere-se ao posicionamento com precisão da ordem do centímetro, com apenas um receptor, no modo estático, e um longo período de coleta de dados. Já o PPP no modo cinemático a precisão das coordenadas estimadas se deteriora para alguns decímetros. Deve-se considerar no processamento a combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*) para o código e fase de batimento da onda portadora (LEICK, 2004). A qualidade das coordenadas estimadas está relacionada principalmente aos erros considerados no processamento dos dados cuja remoção parcial ou completa dos efeitos é realizada através de modelos matemáticos. A maioria dos modelos foi desenvolvida com base em teorias enquanto outros tiveram seus parâmetros determinados empiricamente, como é o caso de alguns modelos da troposfera.

Um dos requisitos para realizar o PPP é dispor das posições e do erro do relógio de cada satélite com alta acurácia. Essa informação é disponibilizada pelos centros integradores de órbitas (CIO), que estimam as efemérides precisas e os erros dos relógios dos satélites, fornecendo-as sem nenhum custo (IGS, 2008). Esses produtos, especificamente as efemérides, atualmente encontram-se disponíveis em três níveis de qualidade: efemérides ultra-rápidas, rápidas e precisas. A principal diferença entre cada um desses produtos está relacionada com sua qualidade, que advém do lote de dados utilizado para estimar os parâmetros, fator determinante para a latência das efemérides rápidas e precisas bem como as estimativas dos erros dos relógios dos satélites. Além da adoção desses produtos no

processamento, modelos matemáticos adequados devem ser utilizados para o tratamento de todos os erros.

2.2 Modelos matemáticos envolvidos no PPP

Quando se dispõe de dados de receptores de dupla frequência, tanto para fase (L1 e L2) quanto para o código (P1 e P2), a combinação *ion-free* (Seção 2.3.6) pode ser utilizada para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera das observáveis. Os modelos matemáticos utilizados no PPP que descrevem as observáveis básicas depois de realizada a combinação linear *ion-free*, são apresentados na Equação 1 (MONICO, 2007):

$$\begin{aligned} PD_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_{r,0}^s + dT_r^s m(E) + dm_{PD}; \\ \phi_{r,IF}^s &= \frac{f_I}{c} \rho_r^s + f_I(dt_r - dt^s) + N_{IF} + \frac{f_I}{c} T_{r,0}^s + \frac{f_I}{c} dT_r^s m(E) + dm_\phi. \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

- $PD_{r,IF}^s$ = pseudodistância resultante da combinação linear *ion-free*;
- $\phi_{r,IF}^s$ = fase obtida da combinação linear *ion-free*;
- ρ_r^s = distância geométrica entre o centro de fase da antena do satélite e do receptor;
- dt_r = erro do relógio do receptor;
- dt^s = erro do relógio do satélite;
- N_{IF} = ambigüidade da observável *ion-free*;
- $T_{r,0}^e$ = atraso zenital troposférico obtido de um modelo teórico ou empírico;
- dT_r^s = atraso zenital troposférico residual;
- $m(E)$ = função de mapeamento em função do ângulo de elevação E do satélite;
- dm_{PD} = efeito do multicaminho na pseudodistância;
- dm_ϕ = efeito do multicaminho na fase;
- c = velocidade da luz no vácuo (299.792.458 m/s);
- f_I = frequência da observável *ion-free*.

No modelo matemático para a pseudodistância e fase da onda portadora (Equação 1), aparecem apenas os erros mais comuns. O erro do relógio do satélite dt^s é

injunctionado pelo valor fornecido no arquivo de efemérides precisas. O atraso troposférico total é representado por uma parcela constante $T_{k,0}^p$, relacionada à componente hidrostática, geralmente modelada e $dT_k m(\vartheta^p)$, que é uma variável referente principalmente à componente úmida, mapeada por uma função de acordo com o ângulo de elevação do satélite. Essa última possui uma alta taxa de variação durante poucas horas sendo de difícil modelagem, fazendo com que passe a ser tratada como um parâmetro no processamento. No caso do efeito do multicaminho (dm), ao realizar a combinação *ion-free*, os erros provenientes desse efeito e ruídos são ampliados. Devido ao fato do efeito do multicaminho ser altamente dependente de cada ambiente onde o levantamento está sendo realizado, a modelagem desse efeito torna-se difícil (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLINS, 2001). Para minimizar tal problema, pode-se utilizar antenas específicas, as quais são descritas na Seção 2.3.9.

2.3 Erros envolvidos no PPP

A Tabela 1 apresenta os principais erros envolvidos no GNSS e, por consequência, no PPP.

Tabela 1 - Fontes de erros presentes no posicionamento por GPS

Fontes de erro	Erros	Magnitudes aproximadas
Satélite	Órbitas	
	transmitidas	~1,6 m
	precisas	
	IGU	
	predita	~ 10 cm
	observada	< 5 cm
	IGR	< 5 cm
	IGS	< 5 cm
	Relógio	
	transmitidas	~7 ns
precisas		
IGU		
predita	~5 ns	

	observada IGR IGS Atraso no hardware Antena Relatividade <i>Phase wind-up</i>	~0,2 ns 0,1 ns <0,1 ns
Atmosfera	Ionosfera Troposfera	2 – 10 m no zênite 2,3 – 2,5 m no zênite
Local	Perdas de ciclo Multicaminho Cargas hidráulicas	20 cm ou mais Pseudodistância: < 150 m Fase: < 5 cm alguns cm
Estação	Rotação da Terra Movimento da crosta Marés terrestres Movimento do pólo Carga dos oceanos Pressão da atmosfera	~30 m ~10 cm ~40 cm ~ 6 m ~ 2cm
Antena	Centro de fase Variação do centro de fase	1 - 10 cm 1-20 mm
Receptor	Erro do relógio Atraso no hardware Ruídos	Pseudodistância: 0,25 – 0,5 m Fase: 1 – 2 mm

Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

A seguir são descritos cada um dos erros presentes no GNSS, bem como formas de eliminação ou minimização de cada um deles no PPP.

2.3.1 Erros orbitais

Os erros relacionados à determinação das órbitas dos satélites estão diretamente ligados aos modelos de cálculo das coordenadas e ao período de dados utilizado pelos CIO. Pode-se dizer que as efemérides transmitidas são as menos precisas, por representarem a órbita dos satélites por meio de um modelo simplificado. As efemérides precisas apresentam os valores das coordenadas do satélite e erros dos relógios para determinados instantes, em geral a cada quinze minutos no sistema de tempo GPS. A interpolação pode ser utilizada para determinar as posições nos demais instantes e a adoção de um polinômio mais refinado, como o de Chebyshev (CHEN et al, 1996) é recomendável. Geralmente essas órbitas são produzidas por diversos CIO, sendo um deles o IGS. Kouba (2003) apresenta um estudo comparativo da qualidade dessas efemérides e na **Tabela 2** são apresentadas algumas informações relacionadas aos diferentes produtos disponibilizados pelo IGS.

Tabela 2 - Qualidade das efemérides precisas e erros dos relógios dos satélites produzidos pelo IGS

Órbitas	Acurácia posição/tempo	Latência	Disponibilidade	Intervalo
Transmitida	~160 cm/~7 ns	Tempo real	12 vezes ao dia	Diário
Ultra-rápida (IGU) Parte Predita	~10 cm/~5 ns	Tempo real	4 vezes ao dia	15 min/15min
Ultra-rápida (IGU) Parte Observada	<10 cm/~0,2 ns	Tempo real	4 vezes ao dia	15 min/15min
Rápida (IGR)	~5 cm/0,1ns	17 horas	Diária	15 min/5min
Final (IGS)	<5 cm/<0,1 ns	~13 dias	Semanalmente	15 min/5min

Fonte: Adaptado de IGS (2008)

De acordo com a Tabela 2, para o posicionamento pós-processado, caso desta pesquisa, torna-se interessante utilizar as efemérides IGR ou IGS, devido a melhor qualidade proporcionada.

2.3.2 Erro do relógio do satélite

O sincronismo de todos os módulos relacionados à geração dos sinais dos satélites GPS é dado por um padrão de tempo atômico. Geralmente, cada satélite tem a bordo um par de relógios de Césio e um par de Rubídio. Apesar desses relógios serem considerados de alta estabilidade, apresentam deriva com relação aos padrões que mantêm o tempo GPS. Esse erro tem sido determinado pelo segmento de controle e enviado aos satélites juntamente com a mensagem de navegação na forma de um polinômio de segundo ordem. Uma das formas para minimizar o erro do relógio do satélite é adotar esse modelo, cuja precisão está em torno de 7 ns. Correções melhores que 0,1 ns podem ser obtidas aplicando-se as correções determinadas pelo IGS e divulgadas nas efemérides precisas em intervalos de 15 minutos. Estas correções dos relógios podem também ser obtidas em arquivos específicos, sendo disponibilizadas nos arquivos de extensão clk a intervalos de 15 ou 5 minutos. Esse último, com correções em intervalos de 5 minutos, passou a ser oficialmente mais um produto disponibilizado pelo IGS desde a semana 1087 (5 de novembro de 2000). Mais informações a respeito desses produtos pode ser encontrado em IGS (2000).

Outra forma de minimizar o erro do relógio do satélite seria realizar as duplas diferenças, procedimento que praticamente o eliminaria. Porém, essa alternativa está fora do contexto do PPP, no qual, obviamente, não se realiza duplas diferenças entre estações.

2.3.3 Atrasos no hardware do satélite

Esse erro é conhecido como *Interfrequency biases* (IfB) e *Differential Code Biases* (DCB) e ocorre devido ao fato dos sinais GPS (L1 e L2) percorrerem caminhos diferentes no hardware do satélite. O mesmo ocorre no receptor, quando esse rastreia esses sinais (portadoras). No caso dos satélites, o valor desse atraso é determinado durante a fase de testes, passando a ser divulgado nas mensagens de navegação, diferente para cada satélite e identificado como T_{GD} , representando o atraso de grupo (*group delay*). Os valores do T_{GD} variam com o tempo, logo devem ser estimados com dados rastreados por receptores instalados em estações terrestres. Vale ressaltar que a técnica de extração dos códigos (C/A, L2C, P1 e P2) contidos nas portadoras, adotada por cada tipo de equipamento, é levada em consideração (MONICO, 2007).

A aplicação do T_{GD} é necessária para procedimentos que requeiram a correção do erro do relógio do satélite, passando, portanto, a ser um valor que deve ser

considerado. Quando o valor do T_{GD} é se faz necessário para corrigir o seu efeito na portadora L2, deve ser multiplicado pela constante 1,64694, já que os valores do T_{GD} são estimados com relação à portadora L1 (WILSON et al, 1999).

2.3.4 Antena do satélite

Os centros de fase da antena e de massa do satélite (referência para as coordenadas) não são coincidentes. Logo, a diferença (*offset*) entre esses dois pontos deve ser conhecida com grande precisão. O IGS fornece esse valor num sistema de coordenadas fixo ao satélite, mais especificamente, referido ao centro de massa do mesmo. Para os satélites do Bloco II e IIA, o sistema de controle injuncionou essas diferenças, sendo estimadas por um processo de calibração realizado para cada satélite. A determinação desses *offsets* em órbita pode fazer com que outras incógnitas absorvam parte dos erros quando determinados em conjunto (MONICO, 2008).

A partir da mais recente realização do ITRS, o ITRF 2005, as correções absolutas para o centro de fase, tanto das antenas dos satélites quanto dos receptores, passaram a ser disponibilizadas pelo IGS (IGS, 2008a). As correções absolutas estão fornecidas no formato ANTEX () e são constantemente atualizadas e disponibilizadas no arquivo <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/cb/station/general/igs05.atx>.

2.3.5 Relatividade

A relatividade é dividida em duas categorias, sendo elas: relatividade geral e especial (específica). A correção dessa última faz-se necessária todas as vezes que uma fonte de sinal ou receptor, ou ambos, esteja se movendo com relação a um referencial. No caso da relatividade geral, deve-se corrigi-la sempre que a fonte transmissora e a receptora estejam em potenciais gravitacionais diferentes (KAPLAN, 1996).

Os efeitos da relatividade geral, relacionados ao GPS, são compensados nos satélites que estejam atuando sobre a frequência padrão que sincroniza os sistemas dependentes. O oscilador de 10,23 MHz é ajustado pelo segmento de controle em $4,55 \times 10^{-3}$ Hz a menos da frequência teórica, fazendo com que o usuário não tenha que corrigir esse efeito. Porém, uma correção relativística deve ser aplicada devido à excentricidade da órbita dos satélites que faz com que a velocidade dos mesmos varie sistematicamente ao longo da

trajetória percorrida. Esse fato faz com que a marcha do relógio dos satélites seja mais lenta no perigeu e mais rápida no apogeu. A correção desse efeito ao relógio dos satélites depende de algumas variáveis como apresenta a Equação 2 (KAPLAN, 1996):

$$\Delta t_r = Fe\sqrt{A} \sin E_k ; \quad (2)$$

onde:

- $F = -4,442807633 \times 10^{-10}$ s/m;
- e = excentricidade da órbita;
- A = semi-eixo maior da órbita do satélite;
- E_k = anomalia excêntrica da órbita do satélite.

Este efeito relativístico geral, quando não corrigido, pode alcançar 70 ns, correspondendo a um erro de 21 metros na pseudodistância. Além disso, os sinais GPS ainda sofrem uma curvatura espaço-tempo devido ao campo gravitacional da Terra. A magnitude desse efeito pode alcançar 0,001 ppm no posicionamento relativo e aproximadamente 18,7 mm no posicionamento por ponto (KAPLAN, 1996).

2.3.6 Ionosfera

A ionosfera é uma das camadas da atmosfera considerada como um meio dispersivo e encontra-se entre 70 e 1000 km, aproximadamente, acima da superfície terrestre. O erro devido à interação dos sinais GPS com os constituintes dessa camada, para um período de máxima atividade solar e para satélites próximos ao horizonte, pode ser superior a 100 m nas distâncias medidas (NEWBY e LANGLEY, 1992 apud MATSUOKA, 2007²). O erro é diretamente proporcional ao TEC existente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal nas camadas da ionosfera, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O TEC possui variação no tempo e no espaço sendo influenciado por variáveis, como: ciclo solar, atividade geomagnética, localização geográfica, época do ano, hora do dia, entre outros (LEICK, 2005).

² NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B.. Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model? In: *Proceeding of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Columbus, OH, USA, v.1, p.240-244, Mar. 16-20, 1992.

Os efeitos devido à ionosfera podem ser minimizados por meio da combinação linear entre as frequências L1 e L2 denominada *ion-free (ionosphere free)* ϕ_{IF} . A Equação 3 mostra essa combinação para a observável fase da onda portadora:

$$\phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{L1} - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_{L2}, \quad (3)$$

onde: f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras L1 e L2, respectivamente para as medidas de fase ϕ_1 e ϕ_2 .

Os coeficientes utilizados na combinação linear *ion-free* com as medidas de L1 e L2 são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes da *ion-free*

Unidade	$\frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)}$	$-\frac{f_1 f_2}{(f_1^2 - f_2^2)}$
Ciclos	2.54573	-1.98368
Metros	2.54573	-1.54573

A combinação *ion-free* também deve ser aplicada para as medidas de pseudodistância e considerada para as correções adotadas para a antena do receptor, incluindo os *offset* e variações de centro de fase.

Vale lembrar que esta combinação contempla apenas os efeitos de primeira ordem, restando os de ordem superior, porém de menor magnitude. Usuários com receptores de simples frequência não podem construir tal combinação ao realizar o posicionamento por ponto, devendo, portanto, utilizar os modelos da ionosfera disponíveis, tal como o modelo de Klobuchar cujos coeficientes são disponibilizados nas mensagens de navegação. Caso o método relativo seja utilizado, os erros são praticamente eliminados quando realizadas as duplas diferenças, desde que as condições da ionosfera sejam semelhantes para as estações. Caso contrário efeitos residuais poderão prejudicar a solução dos parâmetros, como por exemplo das ambigüidades. Detalhes relacionados aos efeitos da ionosfera no posicionamento relativo podem ser encontrados em Dal Poz (2005).

Os efeitos de segunda e terceira ordem estão relacionados principalmente ao campo geomagnético e ao TEC, respectivamente. Para eliminar esses efeitos, a metodologia apresentada em Marques (2008) pode ser adotada.

2.3.7 Troposfera

Quando os sinais GPS são propagados através da troposfera, camada situada logo acima da superfície terrestre e se estendendo até aproximadamente 50 km, sofrem um atraso ao longo de suas trajetórias devido aos gases presentes nessa camada. O nitrogênio e o oxigênio, gases mais abundantes na atmosfera, são os maiores contribuintes para a refração ou atraso troposférico. Esse atraso, relacionado à componente hidrostática, corresponde a aproximadamente 2,3 metros no zênite, porém com uma variação muito pequena dependente da temperatura e pressão. Uma variação de menor magnitude, com valores entre 1 a 35 cm no zênite, se deve à presença do vapor d'água na atmosfera, denominada de componente úmida. Por variar rapidamente em poucas horas é de difícil modelagem. De maneira simplificada, o atraso troposférico total pode ser escrito como (MONICO, 2007):

$$T_r^s = mh(E)T_{ZH} + mw(E)T_{ZW}, \quad (4)$$

sendo que:

- T_{ZH} representa o atraso zenital troposférico relacionado à componente hidrostática (*dry*);
- T_{ZW} representa o atraso zenital troposférico relacionado à componente úmida (*wet*);
- $mh(E)$ e $mw(E)$ são funções de mapeamento que relacionam, respectivamente, o atraso troposférico hidrostático e o úmido com o ângulo de elevação do satélite.

O atraso troposférico hidrostático pode ser aproximado pela expressão (Webb, 1993):

$$T_{ZH} = 1,0130 \cdot 2,27 \cdot e^{-0,116 \cdot 10^{-3} \cdot h}, \quad (5)$$

sendo h a altura geométrica da estação em quilômetros.

Existem outros modelos para a componente hidrostática da troposfera que fornecem estimativas mais acuradas. Dente eles pode-se citar os modelos de Hopfield, Saastamoinen, Niell etc. O modelo de Niell consiste do modelo de Hopfield com as funções de mapeamento de Niell (MONICO, 2007):

Modelos para estimar um valor para a componente úmida dependem de um conhecimento da temperatura da coluna de ar ao longo da trajetória do sinal, o que muitas vezes é aproximado por um valor médio, não refletindo a realidade. No que se refere à essa componente, deve ser estimada juntamente com os demais parâmetros. (MONICO, 2005a). Geralmente, junto com esses modelos são adotadas funções de mapeamento, sendo que algumas já estão implicitamente nos modelos da troposfera, seja de maneira simplificada ou mais elaborada. Como exemplo, cita-se algumas dessas funções de mapeamento: Chao, Davis, Herring, Marini, Niell, IMF e VMF1 (*Vienna Mapping Function*).

2.3.8 Perda de ciclos

Basicamente um receptor GPS é um sistema capaz de rastrear frequências específicas e decodificar os sinais sobre elas moduladas. O PRN (*Pseudo Random Noise*), também chamado de código, é um desses sinais. Outras observáveis como fase de batimento da onda portadora (fase), número de ciclos inteiros, variação de frequência (efeito Doppler) e amplitude também são medidos.

No que diz respeito à observável fase essa é constituída por uma quantidade inicial mais um número de ciclos inteiros contados desde o primeiro instante de medida. Tem característica contínua até o instante em que o receptor é desligado. Esse número de ciclos compreende a distância entre as antenas satélite-receptor a menos de um valor que é desconhecido durante o rastreo, denominado ambigüidade da fase ou apenas ambigüidade. Esse deve ser solucionado no processamento como um parâmetro adicional.

Na prática, o número de ambigüidades não é único, existindo um para cada satélite e adicionais à cada perda de sintonia do sinal dos satélites. Eventos desse tipo ocorrem devido à ocultação dos satélites por construções, árvores ou ainda devido as condições adversas da ionosfera que afetam diretamente a propagação do sinal. A interrupção do sinal é conhecida pela perda da contagem de ciclos ou simplesmente perda de ciclos (*cycle slips*).

A correção das perdas de ciclo é de grande importância no processamento dos dados, pois devem ser consideradas como parâmetros caso não sejam corrigidas, acrescentando novas incógnitas ao processamento. No caso em que a perda de ciclos é

detectada e não corrigida, assemelha-se ao início de uma nova contagem, sendo necessária a inserção de mais um parâmetro a ser estimado.

Para determinar a magnitude, como também onde ocorreu a perda, diversos algoritmos foram propostos e vem sendo utilizados pela comunidade científica. Mais detalhes são apresentados em Blewitt (1990), Freymueller (1991) e Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001).

2.3.9 Efeito do multicaminho

O caminho teórico pelo qual percorre uma onda eletromagnética, de uma antena transmissora a um elemento receptor seria uma única trajetória direta. Contudo, na prática, isto não ocorre. No caso dos sinais GPS, ao partirem da antena do satélite, já sofrem atenuações devido ao meio de propagação. Ao chegarem próximos à superfície terrestre são recebidos diretamente pela antena do receptor e/ou indiretamente, quando os sinais são refletidos em superfícies próximas à antena. Neste último caso, diz-se que os sinais percorreram múltiplos caminhos, o que origina o nome do efeito do multicaminho.

Sabe-se que o efeito do multicaminho é no máximo $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da portadora, representando aproximadamente 5 cm para a L1 e 6 cm para L2. No entanto esse efeito pode aumentar quando são realizadas combinações lineares com as observáveis (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLINS, 2001). Nesse caso, o efeito do multicaminho é proporcional à taxa de transmissão, sendo o código C/A mais afetado que o código P. Assim, no posicionamento de alta precisão, o efeito de multicaminho deve ser levado em consideração. Portanto, deve-se evitar posicionar a antena em locais propícios a esse efeito (MONICO, 2007).

O multicaminho pode ser minimizado com uso de antenas apropriadas, principalmente aquelas projetadas para receberem sinais polarizados circularmente à direita (RHCP – *Right Hand Circularly Polarization*). As antenas do tipo *choke ring* (Figura 1) têm a capacidade de rejeitar sinais com polaridade invertida como também sinais que cheguem pela superfície inferior. Contudo tal tipo de antena traz uma desvantagem no que diz respeito às suas dimensões físicas, além de não evitar os sinais provenientes de reflexões em superfícies verticais (MONICO, 2007). Em substituição a esse tipo de antena, uma nova tecnologia tem sido aplicada no desenvolvimento de antenas GPS, conhecida como *pinwheel* (Figura 2). Esse novo modelo de antena oferece desempenho similar àquele alcançado pelas antenas *choke ring*, entretanto com tamanho e peso consideravelmente reduzidos (KUNYSZ, 2001).



Figura 1 - Antena choke-ring - estrutura mecânica do modelo AR-25
Fonte: GPSWorld (2008)

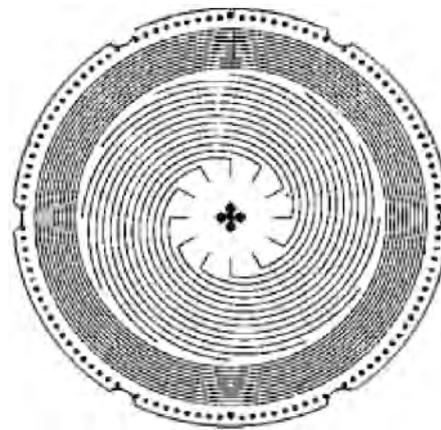


Figura 2 - Antena pinwheel - estrutura interna
Fonte: Kunysz (2001)

Existem também técnicas de redução do efeito do multicaminho dentro do próprio receptor. Entretanto, apenas parte do efeito do multicaminho é minimizada. Outra possibilidade refere-se a reduzir esse efeito no processamento dos dados. No caso do posicionamento relativo, diversas técnicas têm sido desenvolvidas. Uma opção prática que pode ser aplicada tanto para a observável fase como para a pseudodistância utilizando receptores de simples ou dupla frequência é uma metodologia baseada em *wavelets*. Os detalhes dessa metodologia são descritos em Souza (2004; 2008).

2.3.10 Rotação da Terra

As observáveis de fase e pseudodistância GPS são afetadas pelo movimento de rotação da Terra, cuja velocidade é aproximadamente $\omega_e = 7,2921151467 \times 10^{-5}$ rad/s. Esse efeito, também é conhecido como *Sagnac*, é aditivo ou subtrativo, dependendo da direção do sinal que chega à antena do receptor.

No instante em que o sinal parte da antena de um satélite GPS, que se encontra aproximadamente a uma altura de 22.100 km, a antena do receptor, que se encontra fixa à Terra, não o recebe no mesmo instante. Isto se deve ao fato que o sinal deve percorrer uma trajetória com velocidade, em princípio, igual à velocidade da luz no vácuo $c = 299.792.458$ m/s. Ao chegar à antena do receptor, esta não se encontra na mesma posição em que se encontrava no instante de transmissão do sinal, com relação a um referencial externo à Terra. Isto se deve principalmente ao movimento de rotação terrestre. Esse efeito pode ser corrigido aplicando a Equação 6 (MONICO, 2007):

$$\begin{bmatrix} X^s \\ Y^s \\ Z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{s'} \\ Y^{s'} \\ Z^{s'} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

sendo $\alpha = \omega_e \tau_r^s$ de forma que τ_r^s representa o tempo de propagação do sinal do satélite à antena do receptor. (X^s, Y^s, Z^s) são as coordenadas cartesianas do satélite corrigidas do efeito de rotação da Terra. $(X^{s'}, Y^{s'}, Z^{s'})$ representam as coordenadas do satélite no instante de transmissão do sinal.

Uma estimativa aproximada da magnitude desse erro pode ser calculada. Como exemplo, adotando o tempo de propagação $\tau \cong 74$ ms ($\tau = 22.100.000 / 299.792.458$), o erro é de aproximadamente 35 metros para a pseudodistância. Logo, é um efeito que deve ser considerado no processamento.

2.3.11 Movimento do pólo

Define-se o movimento do pólo como a translação entre o eixo instantâneo de rotação da Terra e a crosta. Este movimento tem características periódicas e uma delas é conhecida como movimento de Chandler, com período de aproximadamente 434 dias, com amplitude que pode chegar a 10 m. Modelos geofísicos da Terra explicam satisfatoriamente o movimento do pólo de maneira aproximada, mas existem variações residuais que ainda deterministicamente não podem ser modeladas, sendo assunto de pesquisa.

Os efeitos do movimento do pólo afetam principalmente as coordenadas latitude e longitude. Tal influência pode ser subtraída desde que se adote uma origem convencional, ou seja, um pólo médio, no qual todas as coordenadas estão referenciadas. Desta forma, o pólo terrestre convencional (CTP – *conventional terrestrial pole*) é definido como sendo a média das medidas realizadas entre os anos de 1900 a 1905. Logo, o eixo de rotação instantâneo pode ser dado por um par de coordenadas com origem no CTP. A orientação do eixo x é ao longo do meridiano 0° e do eixo y positivo ao longo do meridiano 270° . Na Figura 3 são apresentadas as coordenadas do pólo monitoradas desde 1890 pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference System Service*).

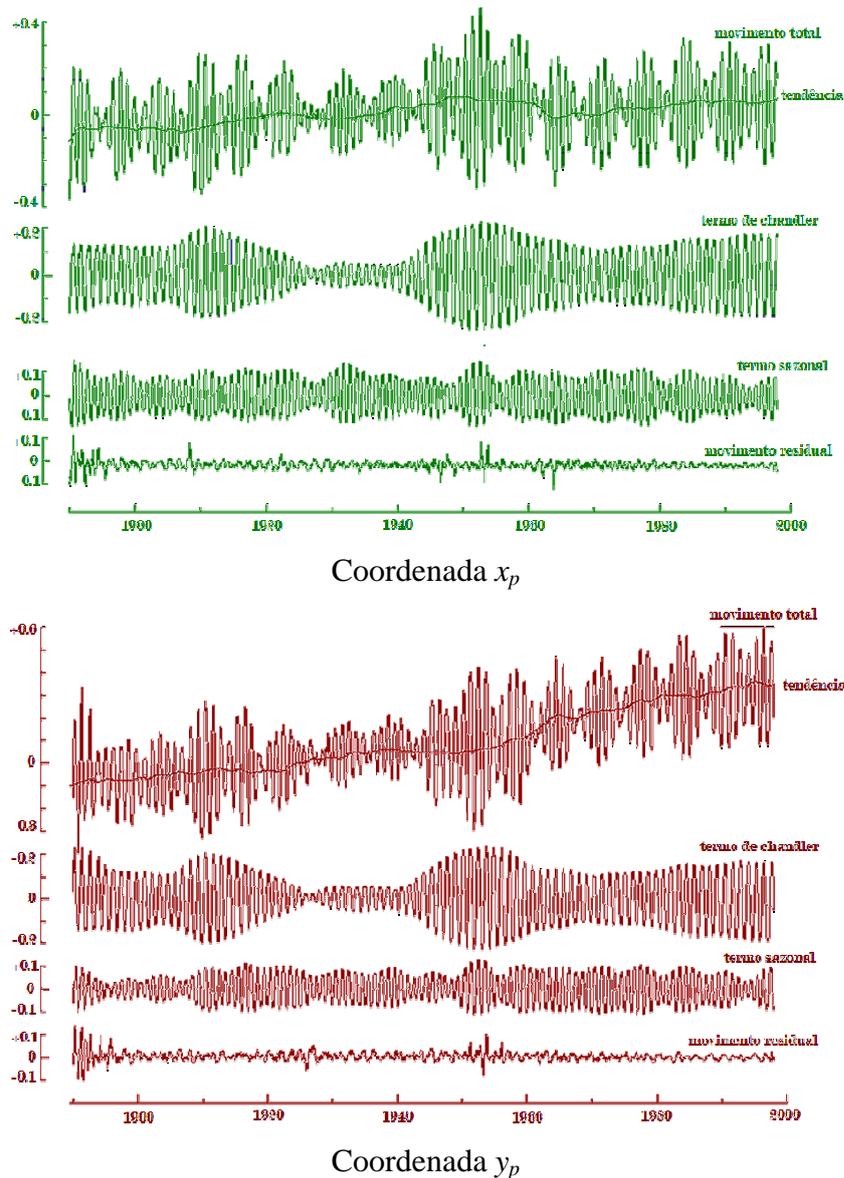


Figura 3 - Movimento do pólo decomposto em suas componentes cíclicas
(Fonte: Adaptado de IERS, 2008)

As correções (x_p , y_p) são fornecidas pelo IERS nos boletins A e B juntamente com outras informações. O boletim A consiste de medidas obtidas a partir de observações com uma atualização semanal entre as edições. O boletim B é obtido a partir de um processamento das observações ao longo de um período, sendo fornecido com uma latência de um mês. Análises a respeito dessas medidas podem ser encontradas em IERS (2007). A teoria relacionada ao movimento do pólo, variações seculares são apresentadas em McCarthy (2004) e Mueller (1969).

Outro efeito, apenas mencionado, mas também relacionado à rotação da Terra é a variação do comprimento do dia. Os valores medidos referentes ao LOD (*length of day*) são fornecidos nos mesmos boletins A e B.

Essas informações, movimento do pólo e LOD, são essenciais aos *softwares* científicos para processamento de dados GPS. São utilizadas pelas rotinas de transformação de coordenadas entre o sistema terrestre e o celeste (MONICO, 2004).

2.3.12 Cargas sobre a crosta

A crosta terrestre sofre o efeito de cargas e responde de acordo com a massa sobre a mesma. O equilíbrio implica em uma alteração na forma da placa ao longo de um eixo coincidente ao vetor gravidade. Logo, as estações GPS sofrem variações, principalmente na componente vertical. Um estudo relacionado ao assunto é apresentado em Bevis et al (2005).

2.3.13 Movimento da crosta

A crosta terrestre está em constante movimento, pois se encontra sobre o manto de material fluido, um dos constituintes das diferentes camadas do interior da Terra. Essa crosta consiste na camada mais superior do planeta. Aparentemente sólida, a crosta é dividida em placas que mutuamente interagem entre si criando assim zonas de expansão e subducção, também conhecidas como zonas divergentes e convergentes, respectivamente. Dessa dinâmica, variações aparecem nas coordenadas de estações sobre a placa. Estas são decompostas em componentes vetoriais que representam a velocidade da estação, dada pela terna (V_x , V_y , V_z).

Atualmente, com técnicas de posicionamento por satélites cada vez mais precisas, principalmente o GPS, as coordenadas tridimensionais obtidas passam a ter uma componente temporal, ou seja, uma época na qual essas coordenadas são válidas, já que são suscetíveis a variações no tempo. Esta variação está relacionada principalmente ao movimento das placas litosféricas, cuja velocidade pode ser superior a 5 cm por ano em várias regiões do planeta. A Figura 4 mostra o vetor velocidade resultante que indica o sentido de deslocamento de algumas estações IGS espalhadas pelo globo.

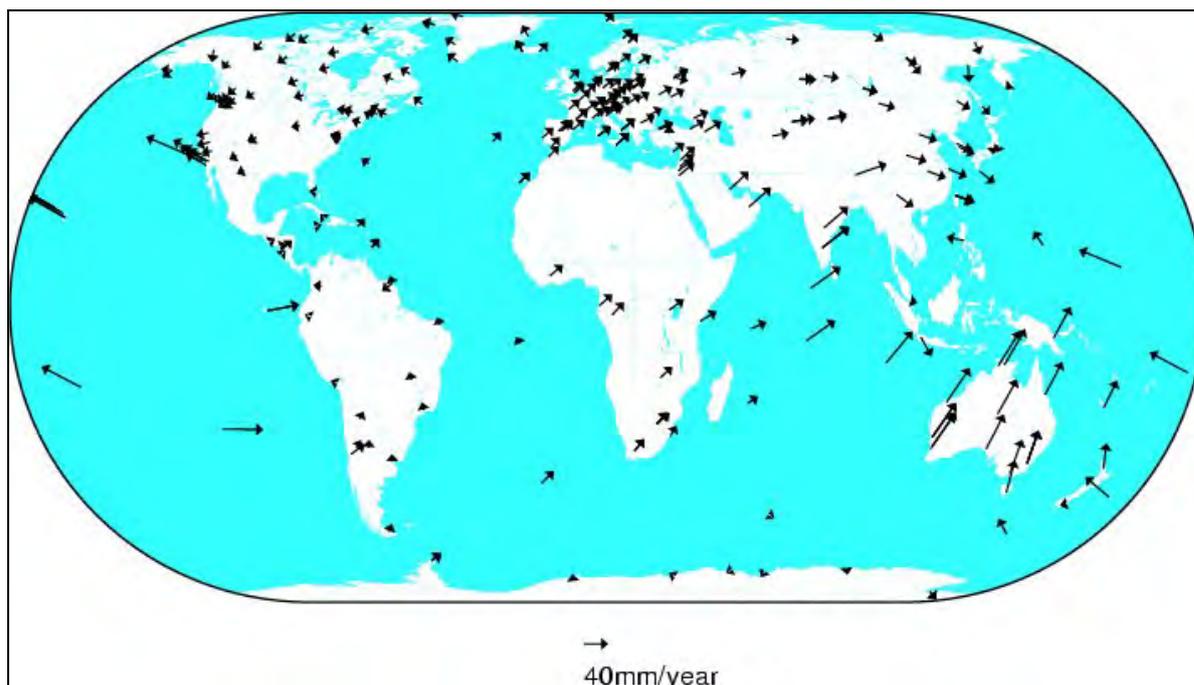


Figura 4 - Vetores velocidade para as estações pertencentes ao IGS
(Fonte: IGS, 2007)

O movimento das placas tem sido aproximado por modelos tais como o NNR-NUVELL1-A (*No Net Rotation - Northern University Velocity Model*)³, uma versão aperfeiçoada do NUVEL-1. Mais detalhes são dados em Leick (2004) e McCarthy e Petit (2004). Contudo, esses movimentos podem ser determinados usando as técnicas de posicionamento, sendo o GPS uma delas.

2.3.14 Marés terrestres

As marés terrestres são causadas pela variação da atração gravitacional do Sol e Lua sobre a Terra devido ao movimento de rotação deste planeta. Essas variações são calculadas por modelos que se baseiam no movimento dos corpos celestes, calculadas com base na latitude do local. A amplitude pode chegar a 40 cm na componente vertical e 5 cm na horizontal. O modelo que permite calcular estas variações e expressões de ordem superior pode ser obtido em McCarthy e Petit (2004):

³ NNR (*No Net Rotation*) é uma das condições estabelecidas na realização de um sistema de referência terrestre e comparece, geralmente, com outra condição denominada NNT (*No Net Translation*). Mais informações a respeito dessas injunções podem ser encontradas em Monico (2005b, 2006)

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left(\frac{3}{2} (\hat{R}_j \hat{r})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R}_j \hat{r}) \left[\hat{R}_j - (\hat{R}_j \hat{r}) \hat{r} \right] \right\}; \quad (7)$$

sendo:

- $\Delta\vec{r}$ = vetor deslocamento $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$;
- GM_\oplus = constante gravitacional da Terra;
- GM_j = constante gravitacional da Lua ($j = 2$) e Sol ($j = 3$);
- \hat{R}_j, R_j = vetores unitários referentes à magnitude do centro da Lua ou Sol (depende de j);
- \hat{R}_e = raio equatorial da Terra;
- \hat{r}_j, r_j = vetores unitários e magnitude para o geocentro para a estação;
- h_2, l_2 = números de Love e Shida, respectivamente, referentes ao grau 2.

Quanto à determinação prática da influência das marés terrestres sobre as estações, o usuário pode calcular uma estimativa dessa grandeza por meio de modelos. Encontra-se disponível em <http://home.comcast.net/~dmilbert/softs/solid.for.txt> um código em linguagem Fortran que permite calcular a influência das marés terrestres a partir dos parâmetros de entrada fornecidos, os quais consistem das coordenadas da estação e a data de interesse. Na Figura 5 é apresentado o efeito de marés terrestres para a posição da estação PPTE, calculado para a data de 01 de setembro de 2008.

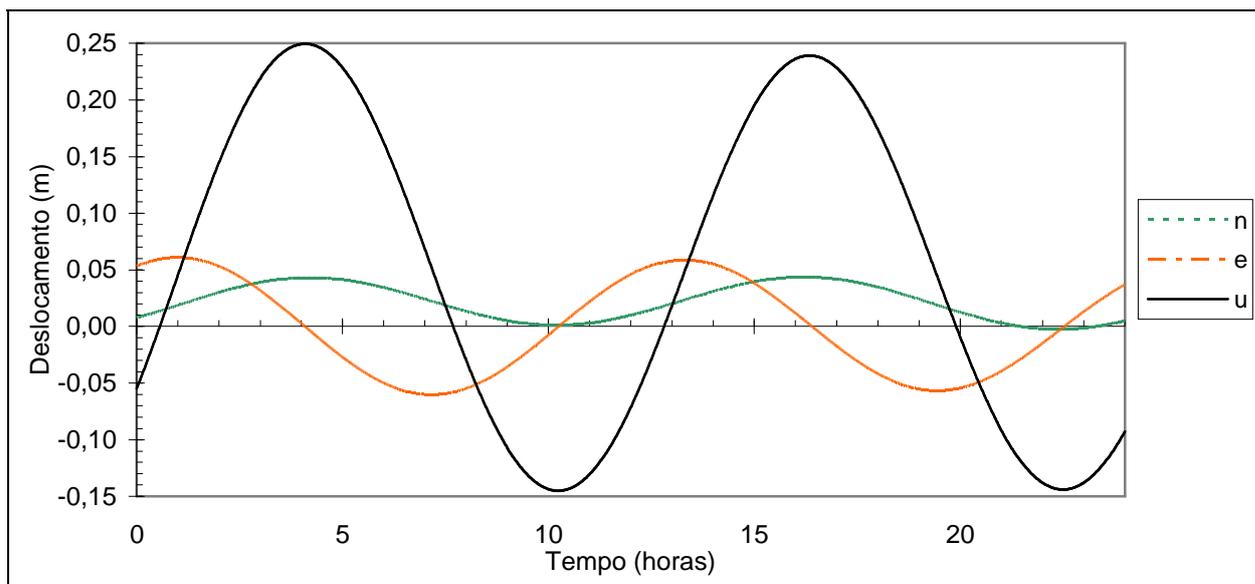


Figura 5 - Deslocamentos da estação PPTE devido às marés terrestres

Na Figura 5 pode-se notar uma amplitude de aproximadamente 40 cm para a componente vertical. Já para as componentes horizontais o efeito é menor. Dessa forma, o efeito das marés terrestres afeta consideravelmente as coordenadas da estação caso não seja corrigido no processamento dos dados, ainda mais no caso do PPP.

2.3.15 Carga de marés oceânicas

A carga de maré oceânica refere-se à deformação da superfície sub-oceânica e regiões litorâneas, resultante da redistribuição de massa (água dos oceanos) durante a ocorrência das marés. Conseqüentemente, a crosta cede devido às forças impostas pelas cargas sobre ela. O deslocamento pode ser calculado por (MCCARTHY e PETIT, 2004):

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{c_j} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{c_j}), \quad (8)$$

sendo:

- Δc = vetor deslocamento;
- A_{c_j} = amplitude dos termos parciais;
- Φ_{c_j} = fase dos termos parciais;

- $f_j, u_j =$ parâmetros dependentes em longitude do nodo lunar;
- $\chi_j =$ argumento astronômico referente à posição do Sol e Lua com $t = 0^h$;
- $\omega_j =$ velocidade angular da maré.

A obtenção dos parâmetros da Equação 8 pode ser através do IERS, que os fornece para as estações que participaram da realização do ITRS. Para outras estações, os valores dos coeficientes devem ser interpolados para a posição das mesmas. O usuário pode calcular a influência desse efeito por meio de algoritmos disponíveis gratuitamente como, por exemplo, <ftp://maia.usno.navy.mil/conventions/chapter7/arg.f> (KOUBA e HEROUX, 2000).

Pode-se obter a contribuição para qualquer data por meio de outra rotina disponível em <ftp://maia.usno.navy.mil/conventions/chapter7/hardisp.f> que, a partir dos parâmetros de entrada, calcula o efeito da maré num sistema local de coordenadas (e,n,u). Os parâmetros do modelo podem ser obtidos *on-line* no endereço <http://www.oso.chalmers.se/~loading>. No anexo A é apresentado, como exemplo, os coeficientes no formato HARPOS e BLQ, obtidos para a estação PPTE e utilizados para calcular a variação diária. Para o dia 01 de setembro de 2008, os resultados são apresentados na Figura 6.

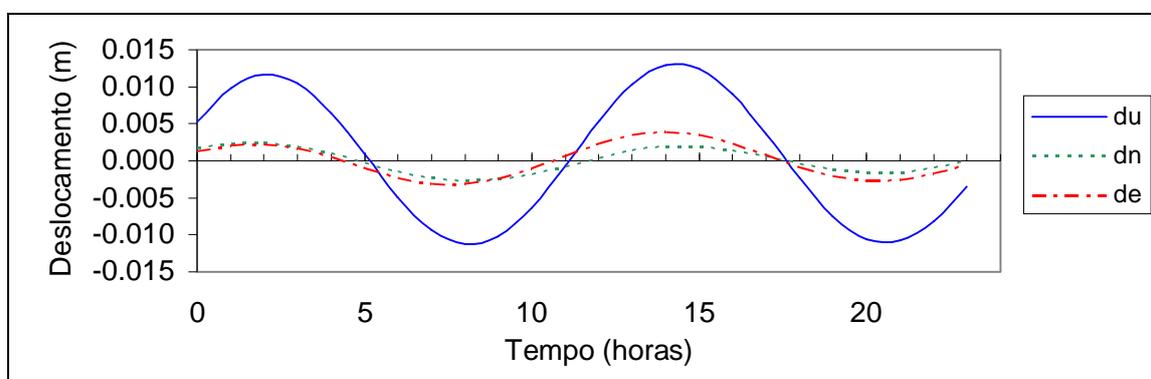


Figura 6 - Efeito de marés oceânicas calculado a partir dos coeficientes obtidos para a estação PPTE

Na Figura 7 são apresentados os resultados calculados para o ano de 2008 com o intuito de apresentar como se desenvolve esse efeito. Nota-se uma componente de longo período.

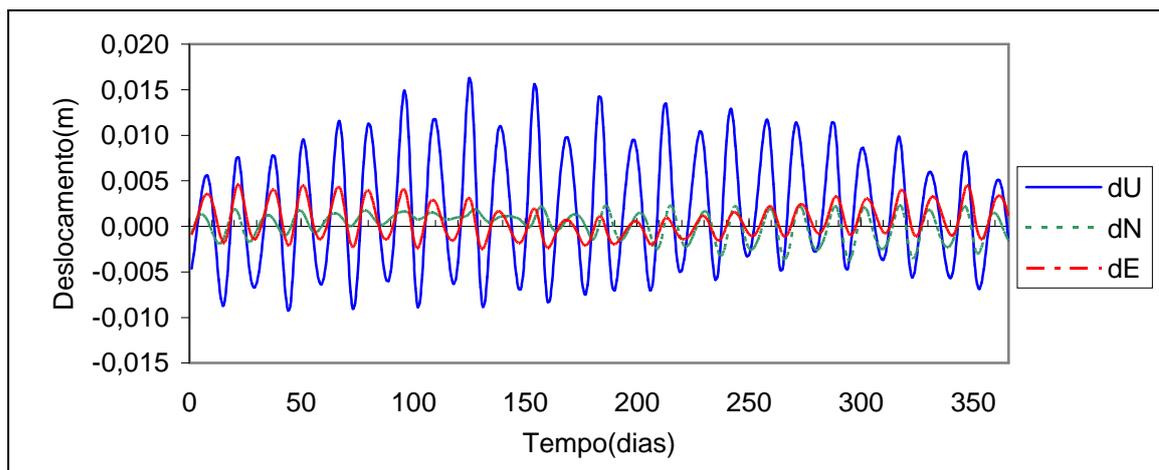


Figura 7 - Variação anual das correções de marés oceânicas calculadas para os 366 dias de 2008 para a estação PPTE

Nota-se a partir da Figura 6 e da Figura 7 que o valor máximo se dá na componente vertical (dU) e, para a estação PPTE, que encontra-se dentro da placa sul-americana (SOAM) o efeito máximo chega a aproximadamente 1,5 cm. No entanto, para estações localizadas próximas ao litoral, o efeito da carga das marés tem maior influência sobre a estação. Tal afirmação pode ser comprovada na Figura 8, que apresenta a variação anual para a estação Fortaleza (BRFT) cuja particularidade é que essa estação encontra-se próxima ao litoral brasileiro.

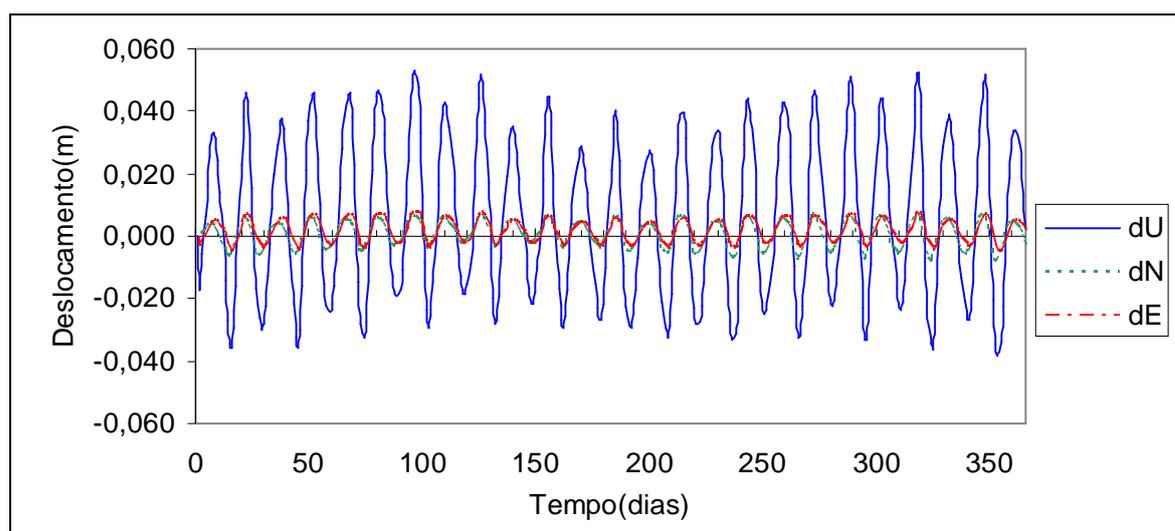


Figura 8 - Variação anual para a estação Fortaleza (BRFT)

Tipicamente, as grandes variações estão relacionadas ao parâmetro M_2 , porém, não excedem 5 cm na componente vertical e 2 cm na horizontal para estações litorâneas (MCCARTHY e PETIT, 2004).

2.3.16 Carga da atmosfera

A atmosfera terrestre também exerce uma força sobre a crosta, pois a distribuição das massas de ar e vapor d'água não é uniforme e pode ser inferida com base na medida da pressão atmosférica. O efeito desta carga se dá principalmente na componente vertical, sendo as maiores deformações associadas a tempestades na atmosfera (MONICO, 2005a).

Estudos demonstraram que o deslocamento vertical da crosta pode chegar a 25 mm em regiões de média-latidade devido aos sistemas de pressão sinópticos (relacionados a chuvas). Os maiores deslocamentos são observados em regiões de alta-latidade devido ao clima. Relacionado às deformações horizontais da crosta, estas são da ordem de um terço da amplitude da componente vertical (McCARTHY e PETIT, 2004).

2.3.17 Rotação de fase (*phase Wind-up ou Wrap-up*)

O erro de rotação da fase pode estar relacionado, tanto ao satélite quanto ao receptor. Logo será tratado neste tópico de maneira geral.

As antenas dos satélites GPS impõem uma característica aos sinais transmitidos por elas, especificamente à onda portadora modulada pelas informações. Essa característica está relacionada à polarização das ondas, as quais são circularmente polarizadas à direita. Para tornar claro esta expressão, na prática consiste em afirmar que a onda é rotacionada em torno do seu eixo de propagação em 360° , repetindo-se à cada comprimento de onda completo da portadora.

O erro de rotação de fase (*phase wind-up*) surge principalmente quando uma das antenas (receptor, principalmente) sofre uma rotação em azimute, acrescentando ou subtraindo à fase medida pelo receptor um ciclo à cada revolução. Esse erro tem grande influência no processamento relativo de linhas de base longas e, quando negligenciado, age negativamente na fixação das ambigüidades das duplas diferenças. No PPP, o efeito também é propagado para os parâmetros do modelo matemático. Na prática esse erro pode alcançar cerca de meio comprimento de onda e pode ser calculado usando a expressão (LEICK, 2004):

$$\begin{aligned}
D' &= \hat{x}' - k(k \bullet \hat{x}') - k \times \hat{y}' \\
D &= \hat{x} - k(k \bullet \hat{x}) - k \times \hat{y}' \\
\zeta &= k(D' \times D) \\
\Delta\phi &= \text{sign}(\zeta) \cos^{-1} \left(\frac{D' \bullet D}{\|D'\| \|D\|} \right)
\end{aligned} \tag{9}$$

sendo:

- k = vetor unitário no sentido satélite antena do receptor;
- D' e D = vetores associados à antena do satélite e receptor, respectivamente. Devem estar associados a um sistema de coordenadas local individual;
- $\text{sign}(\zeta) = 1$ quando $\zeta > 0$; 0 quando $\zeta = 0$ e -1 quando $\zeta < 0$;
- \times = produto vetorial e \bullet produto escalar de vetores.

Com relação à pseudodistância não existe correção do efeito *phase wind-up*, pois a distância é constante, apesar de a fase sofrer alterações (LEICK, 2004).

2.3.18 Centro de fase da antena do receptor

Uma referência para as medidas realizadas pelo um receptor GPS é o centro de fase da antena. Esse local é um ponto inacessível ao usuário, o qual deve realizar medidas com relação a um ponto externo à antena, conhecido como ARP (*Antenna Reference Point*). O ARP é a referência externa a partir do qual se conhece, com elevada precisão, os deslocamentos até o centro de fase da antena. Apesar deste ponto ser bem conhecido fisicamente, eletronicamente não é estável, apresentando variações. A Figura 9 ilustra os principais pontos de uma antena GPS.

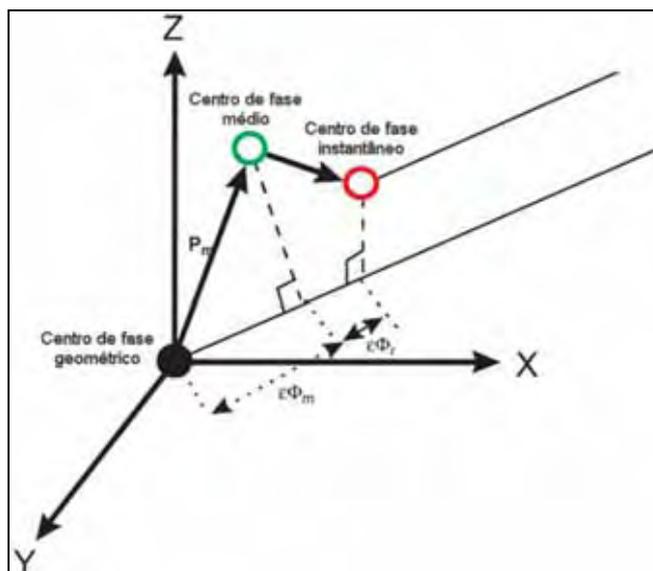


Figura 9 - Geometria do centro de fase de uma antena GPS (AKROUR, 2005)

Em aplicações geodésicas, a posição referente à estação deve ser conhecida na ordem do milímetro. Para obter esse requisito, o conhecimento da posição do centro de fase da antena do receptor é necessário, pois as coordenadas são obtidas nesse ponto de referência da antena (GÖRRES, 2006).

Os efeitos relacionados ao centro de fase da antena são de dois tipos. Um deles está relacionado ao *offset* entre o centro de fase geométrico e o eletrônico. Outro está relacionado à variação deste último com relação ao ângulo de elevação, azimute do satélite e frequência (L1 e L2) (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLINS, 2001).

O centro de fase da antena descreve uma superfície conforme os ângulos de elevação e azimute do satélite variam. Este efeito é denominado de PCV (*Phase Center Variation*). A Figura 10 apresenta o comportamento do centro de fase da antena LEIAX1202 para a frequência L1.

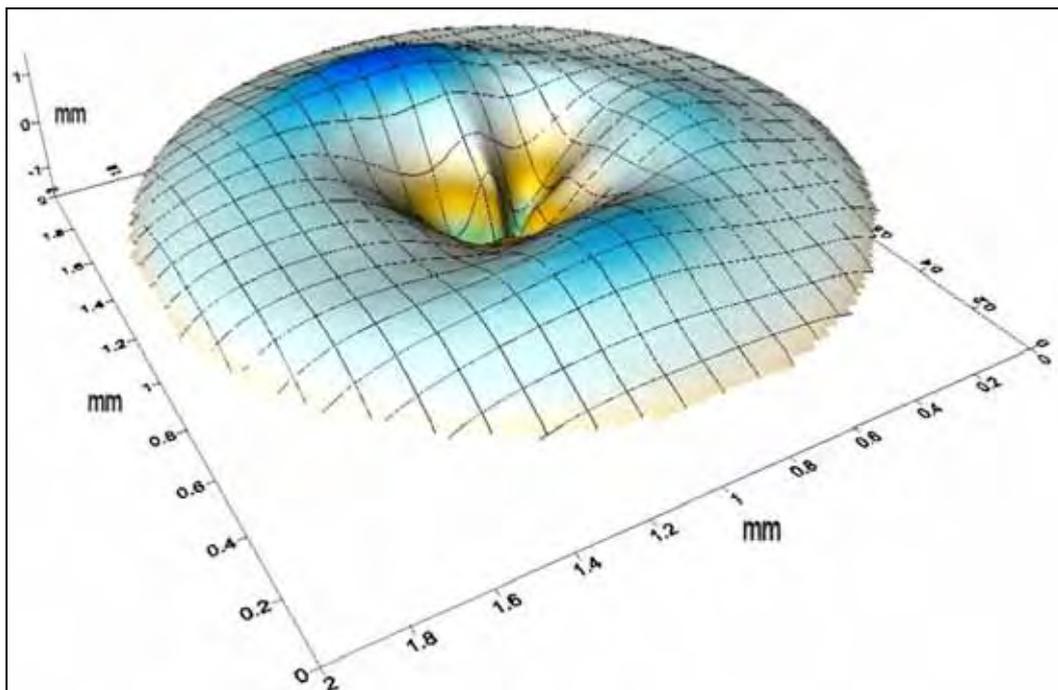


Figura 10 - Superfície formada pela variação do centro de fase (L1) da antena LEIAX1202

Uma das formas de minimizar os efeitos desta variação é por meio de modelos obtidos por calibração, que relacionam frequência, azimute e elevação a um valor de correção. Esses métodos de calibração podem ser divididos em duas categorias: relativo e absoluto. No método relativo, uma linha de base de alguns metros é utilizada para realizar a calibração com relação a uma antena de referência. Em uma das extremidades da linha de base encontra-se a antena a ser calibrada enquanto a outra é uma antena Dorne Margolin, referência para todas as calibrações. Detalhes a respeito do método são dados em Mader (2001, 2005).

Atualmente, a calibração absoluta tem sido realizada para fornecer os valores de calibração. Esse método alternativo foi desenvolvido pela equipe do Prof. Günter Seeber numa parceria entre o IfE (*Institut für Erdmesung*) da Universidade de Hannover e a empresa Geo++. As correções são calculadas com base nas medidas realizadas com a antena em teste montada num braço robotizado, cujos movimentos são precisamente conhecidos. Com isto, uma cobertura de todo o hemisfério da antena é possível, o que não ocorre no processo de calibração relativa, no qual um par de antenas permanece estático por um longo período de coleta. Um detalhamento do processo pode ser encontrado em Görres (2006) e Wübbena (2000).

Rothacher (2001) apresenta um estudo comparativo entre os métodos absoluto e relativo. Os resultados permitem concluir que o primeiro tem mostrado bom desempenho na obtenção do padrão de recepção das antenas que foram por ele analisadas.

Atualmente, o IGS disponibiliza os valores de correção absoluta para a maioria das antenas geodésicas. O arquivo igs05_1499.atx é a atualização mais recente das correções absolutas de variação do centro de fase de diversas antenas. É encontrado juntamente com outros documentos em <http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igs-equipment-files/igs-equipment-files.html>. Estas correções passaram a ser recomendadas desde a data de adoção do ITRF 2005, em 5 de novembro de 2006 (semana GPS 1400). Informações relacionadas a esse sistema de referência encontram-se disponíveis em ITRF (2005).

2.3.19 Erro do relógio do receptor

Os receptores GPS, em sua maioria, são construídos com relógios de baixa qualidade, comparados aos dos satélites. Uma das vantagens do tipo de oscilador utilizado atualmente é o baixo custo de fabricação. Porém, um requisito do posicionamento por ponto simples é que pelo menos 4 satélites estejam visíveis simultaneamente para solucionar as 3 incógnitas relacionadas à posição da antena do receptor e mais um para o erro do relógio do receptor, nesse caso, considerando-se apenas um instante de medida.

No posicionamento relativo, os erros são praticamente eliminados quando realizadas as duplas diferenças. Para isso, a simultaneidade das observações é um fator muito importante (MONICO, 2007). No PPP, o erro do relógio do receptor é estimado no ajustamento juntamente com as outras componentes da estação, porém, ele é tratado como um processo aleatório (ou estocástico), no qual se utiliza o processo conhecido como *white noise* (ruído branco) (GREGORIUS, 1996). Dependendo da qualidade do relógio (padrão atômico externo ou relógio interno do receptor), o erro do relógio do receptor permanece estabilizado em torno de uma reta. Essa característica pode ser verificada na Figura 11, apresentando uma estimativa por PPP referente ao dia 365 de 2007 para o receptor da estação BRFT, conectado à uma fonte externa de tempo H-Maser (MASER⁴ de Hidrogênio).

⁴ MASER – acrônimo para *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

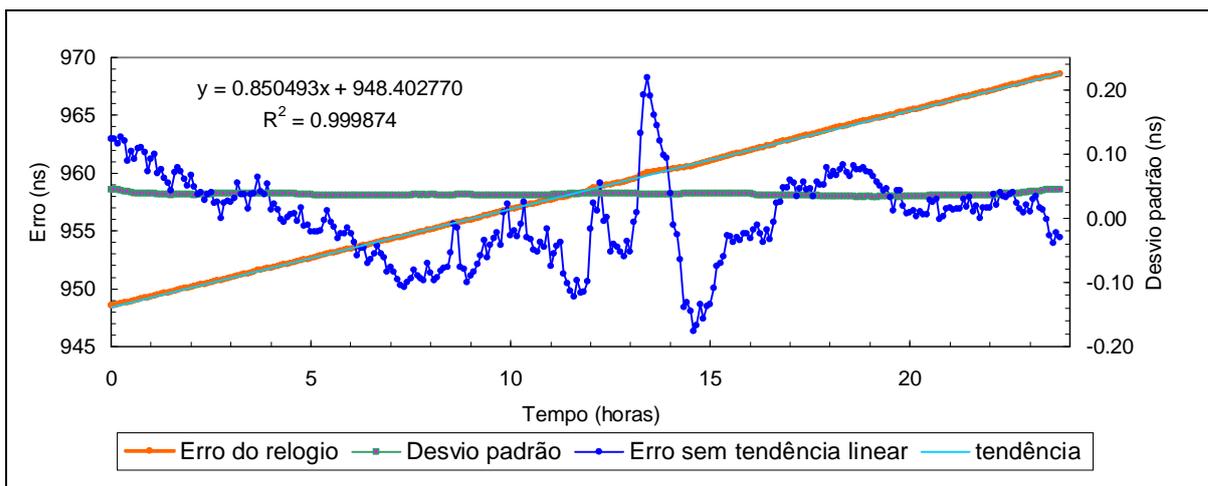


Figura 11 - BRFT: Eixo principal, erro do relógio do receptor e reta ajustada. Eixo secundário, erro sem a tendência linear e desvio padrão. Receptor GNSS Leica modelo GRX 1200 Pro

Um comportamento diferente é encontrado na estação PPTE, onde o erro encontra-se com uma variação relativamente maior quando comparado àquele do receptor da estação BRFT. Um processo de correção interno ao receptor faz com que a tendência do relógio seja removida, logo somente o erro, sem a tendência linear, é apresentado na Figura 12.

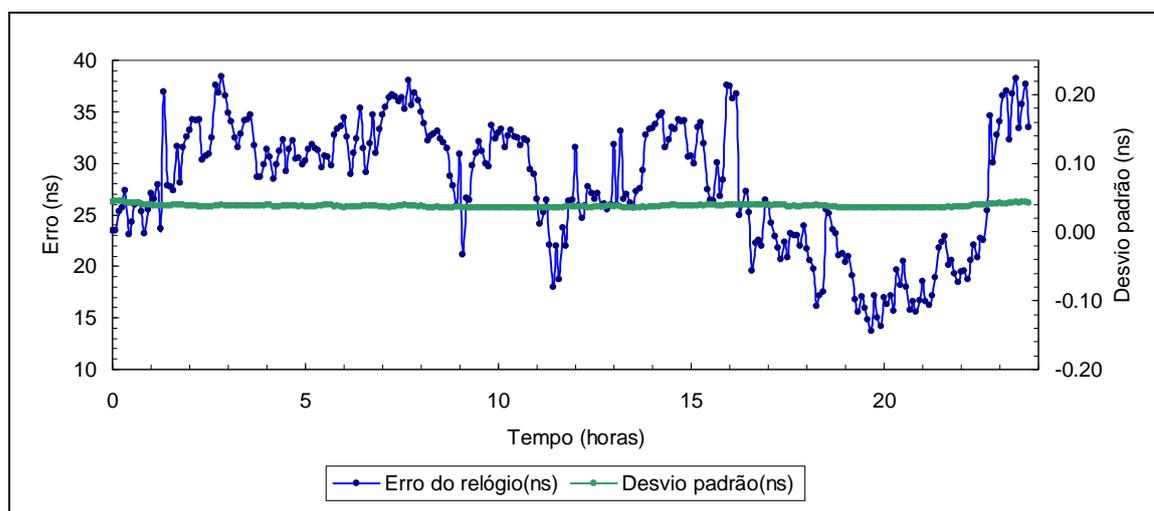


Figura 12 - PPTE: Eixo principal, erro do relógio do receptor. Eixo secundário, desvio padrão. Receptor GPS Trimble modelo NetRS

Os procedimentos de correção do erro do relógio do receptor possibilitam que, no caso de uma rede, as estações registrem suas observações sincronizadas com a escala

de tempo GPS, praticamente atendendo ao critério simultaneidade, fundamental no posicionamento relativo.

2.3.20 Atrasos no hardware do receptor

Os receptores GPS, apesar de serem equipamentos de pequenas dimensões, possuem caminhos pelos quais os sinais percorrem antes de serem analisados pelos comparadores de fase e correlacionadores de código. Estas trajetórias devem ser conhecidas, pois provocam erros sistemáticos nas medidas.

Devido os sinais percorrerem diferentes rotas, surge um erro relacionado ao receptor conhecido como erro entre canais. É corrigido de maneira relativa pelo próprio equipamento no instante de inicialização. Uma descrição sucinta é apresentada em Monico (2005a).

Dependendo do processo de medida das pseudodistâncias, mais alguns efeitos devem ser considerados. Os receptores GPS que utilizam determinadas técnicas de processamento de sinal (*codeless* ou *cross-correlation*) para recuperar o código na portadora, fazem com que uma *bias* apareça, dependente de cada satélite. Essa *bias* têm efeito direto sobre as estimativas do erro do relógio, fixação das ambigüidades e outros parâmetros estimados no processamento dos dados GPS (JEFFERSON et al, 2001). Este erro também é conhecido como *bias* CA-P1. É composto por uma componente constante e outra variável com o tempo. De acordo com Monico (2007) os valores devem ser estimados durante o processamento ou calibrados de forma independente.

3 SÉRIES TEMPORAIS

A análise de séries temporais tem sido atualmente parte de diversas pesquisas, revelando características de eventos que ocorrem no decorrer do tempo e tornando possível identificar os fatores que, de alguma maneira, regem o comportamento delas. Com a evolução da computação eletrônica, novas ferramentas têm sido desenvolvidas, facilitando o estudo de séries longas com mais refino, o que antes era muito dispendioso.

No que diz respeito à análise espectral, constitui-se umas das ferramentas clássicas mais utilizadas no estudo e processamento de sinais determinísticos ou estocásticos. É considerada uma poderosa ferramenta, empregada em diversas áreas das ciências exatas sendo uma delas a análise de séries temporais (OLIVEIRA, 2007).

3.1 Definição

Uma série temporal é qualquer conjunto de dados ou variáveis ordenadas no tempo, ou qualquer outra variável que desempenhe a função de índice. Exemplos de séries temporais são encontrados em diversas áreas das ciências exatas, tais como Meteorologia, Oceanografia, Economia etc. A precipitação atmosférica, o número médio de manchas solares, registros de alturas de marés são exemplos de variáveis que, ao longo do tempo, descrevem uma série temporal.

Dos exemplos citados, têm-se séries temporais discretas, pois o processo de amostragem utiliza intervalos de tempo iguais ao longo do período de medida.

Durante o processo de registro, o volume de medidas gerado pode ser redundante, a exemplo de um sensor que realiza medidas a cada segundo, sendo que o processo apresenta variações à cada minuto. A reamostragem em intervalos de discretização Δt pode ser útil, reduzindo o grande volume de dados a uma série temporal discreta com n pontos compreendidos no intervalo de 0 a T. O número de pontos da série pode ser dado como:

$$n = \frac{T}{\Delta t} . \quad (10)$$

Para o caso de séries temporais discretas, o requisito de agregar valores em intervalos de tempos iguais é desejado. O processo de discretização deve considerar o critério de amostragem de Nyquist (INGLE, 2000), em que a amostragem deve ser pelo menos o dobro da maior frequência que se deseja registrar. Efeitos de alisamento (*aliasing*) ocorrem quando este critério não é considerado. Na prática, para atender o critério de Nyquist, as medidas deveriam ser realizadas em intervalos de pelo menos 24 segundos para que um evento de período de 60 segundos seja registrado.

A análise de séries temporais objetiva construir modelos que as descrevam. Consiste em dois tipos de análises sendo que a primeira, efetuada no domínio temporal cujos modelos possuem um número finito de parâmetros, refere-se aos modelos paramétricos. A segunda é realizada no domínio de frequências cujos modelos propostos são não-paramétricos.

Na Figura 13 estão representadas as estimativas diárias de uma das componentes das coordenadas da estação NAUS (pertencente à RBMC), obtidas pela transformação das coordenadas cartesianas geodésicas para o sistema geodésico local.

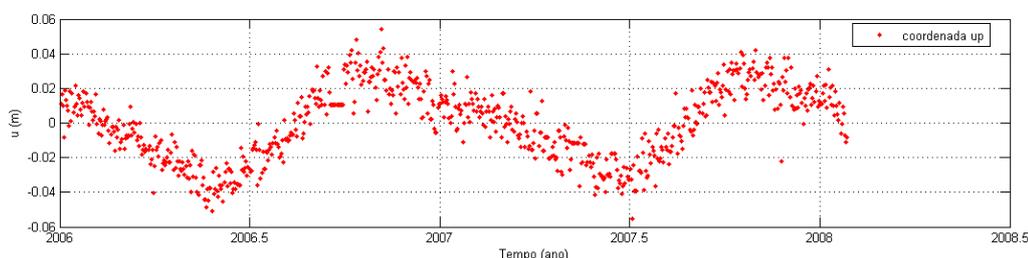


Figura 13 - Série de discrepâncias da coordenada Up do sistema local para a estação NAUS

Dá-se o nome de trajetória ao processo físico em estudo que, no caso da Figura 13, é a variação da componente *up*. A mesma série poderia ser obtida por mais de um equipamento ou, quando possível, repetido o processo de medida. Ao conjunto de todas as trajetórias dá-se o nome de processo estocástico. As diferentes trajetórias são denominadas séries temporais ou funções amostrais. Em outras palavras, as séries temporais consistem de um ou alguns elementos de uma família de trajetórias possíveis. Vale ressaltar que alguns casos não podem ser observados mais que uma vez, tendo-se apenas uma trajetória para análise, exemplo das precipitações (chuvas) (MORETTIN, 2004).

De maneira geral, denota-se uma série temporal como um vetor $Z(t)$, $n \times 1$ com t também sendo um vetor de dimensão $p \times 1$. Isto torna possível escrever uma série temporal na forma de um vetor:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ \dots \\ Z_m(t) \end{bmatrix} \quad m = 1, \dots, n \text{ (n número inteiro)}. \quad (11)$$

Cada valor representa uma grandeza medida, por exemplo, no instante t . Quando m é maior que a unidade, tem-se uma série multivariada e também multidimensional. Para o caso de apenas uma variável sendo medida, tem-se uma série temporal simples, unidimensional e univariada.

3.2 Potencialidades da análise de séries temporais

Com a análise de séries temporais é possível:

- Investigar o mecanismo que gera a série temporal;
- Realizar previsões que, dependendo da variável em estudo, tais previsões podem ser de curto ou longo prazo;
- Apenas descrever o comportamento da série por meio de gráficos ou ferramentas para analisar a existência de tendências ou sazonalidades;
- Verificar se existem períodos relevantes nos dados, procurando encontrar as frequências de determinados ciclos. Uma análise no domínio de frequências é recomendável. Esta pode ser realizada através da análise espectral dos dados.

De forma geral, o estudo das séries temporais busca modelos de natureza probabilística ou estocástica, construídos no domínio temporal ou de frequências. Recomenda-se que estes modelos sejam simples e com um número mínimo possível de parâmetros. Quando possível deve-se adotar um modelo de fácil manipulação.

Há situações ou fenômenos que são caracterizados por uma série de entrada $X(t)$ e uma série resultante ou de saída $Z(t)$, ligados por uma função de transferência $v(t)$. Essa função, quando não existe, é de interesse da análise de séries temporais determiná-la. Para tanto, as séries de entrada e saída são utilizadas. Alguns desses procedimentos exigem

previsões da série $Z(t)$, a partir do conhecimento dos dados de entrada $X(t)$. O processo inverso também pode ser útil para estudar o comportamento do sistema, simulando a série de entrada (MORETTIN, 2004).

Problemas, como perturbações que normalmente afetam um sistema dinâmico, podem ser solucionados através do ajuste conveniente da série de entrada, controlando a série de saída. Essas perturbações no sinal podem afetar a série fazendo com que surjam novos níveis, tornando-a não-estacionária.

3.3 Estacionariedade

É freqüente classificar uma série temporal como estacionária quando ela se desenvolve em torno de uma média, aparentando um equilíbrio estável. Na prática, nem sempre as séries temporais obedecem tal estacionariedade. Um dos casos que pode ser tomado como exemplo refere-se às séries encontradas na economia. Apresentam uma tendência que, no caso mais simples, desenvolve em torno de uma reta com um coeficiente angular (inclinação) positivo ou negativo. Esta inclinação é denominada **tendência linear**. Outro exemplo é o crescimento de uma colônia de bactérias, não obedecendo a um critério linear, mas explosivo, de natureza exponencial (MORETTIN, 2004).

Uma série pode apresentar-se estacionária por um longo período, ou em curtos períodos, mudando de nível ou inclinação ou as duas características simultaneamente. Há modelos capazes de descrever séries estacionárias ou não estacionárias, excluindo as de comportamento explosivo. As séries que apresentam comportamento equilibrado, flutuando em torno de um valor médio por certo período são caracterizadas como séries não estacionárias homogêneas (MORETTIN, 2004). Essas séries ainda podem variar de nível sendo ainda classificadas dentro dessa classe. Um exemplo é apresentado na Figura 14.

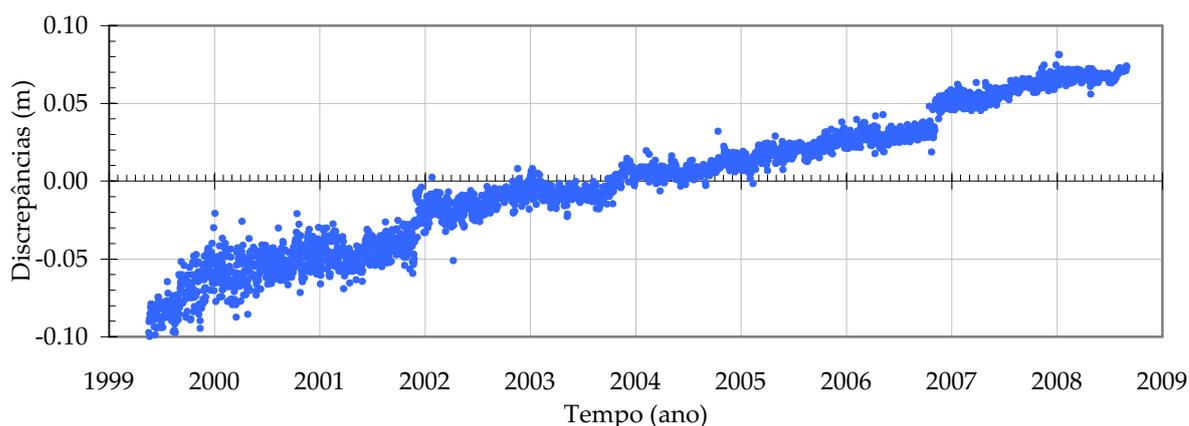


Figura 14 - Série não estacionária, mas homogênea

Na Figura 14 nota-se um salto próximo a 2006,8 indicando algum evento que afetou de forma aditiva o comportamento da série, criando um novo patamar.

Os procedimentos geralmente utilizados em análise estatística de séries temporais trabalham com séries estacionárias, logo, deve-se aplicar uma transformação às não-estacionárias ou seguir procedimentos específicos.

3.4 Ferramentas para análise

Uma série temporal pode ser decomposta em três componentes conforme a Equação 12. Na prática, não são observáveis independentemente uma das outras, pois estão intimamente relacionadas (MORETTIN, 2004).

$$Z_t = T_t + S_t + a_t; \quad (12)$$

tem-se:

- Z_t = observações que compõem a série;
- T_t = tendência;
- S_t = sazonalidade;
- a_t = componente aleatória, com média nula e variância σ_a^2 .

Estimativas das duas componentes, tendência e sazonalidade, podem ser obtidas por ajuste de curvas. A tendência pode ser obtida por meio de um ajuste de uma função linear, quadrática, exponencial ou através de sucessivos ajustes de retas. O mesmo procedimento pode ser feito para obtenção de uma estimativa da sazonalidade.

3.4.1 Procedimento para obtenção da tendência

Considerando que as séries temporais se desenvolvem em torno de uma reta, (média global ou local) pode-se subtrair da série original esta reta ajustada. Desta maneira, a tendência linear pode ser eliminada, obtendo-se uma série livre desta característica.

Uma ferramenta matemática utilizada para obter a reta que representa a tendência de uma série está relacionada ao método dos mínimos quadrados (MMQ). O procedimento de ajuste consiste em estimar os parâmetros que definem a reta que melhor se ajusta aos pontos dados. A escolha da função depende de um estudo do comportamento da série, sendo que esta pode apresentar comportamento exponencial, por exemplo, e o ajuste de uma reta não seria recomendado.

3.4.2 Procedimento para obtenção das componentes sazonais

Semelhante à tendência, a sazonalidade pode ser estimada mediante o ajuste de uma função que melhor descreva o comportamento da série. Os métodos empregados para obtenção da sazonalidade também procuram encontrar um modelo que represente a série que, geralmente, apresenta comportamento cíclico. Logo, uma categoria de funções com esta propriedade pode ser adotada. O comportamento senoidal indicando a presença de sazonalidade em um conjunto de dados é um exemplo típico. Desta forma, o ajuste de uma função trigonométrica revelaria algumas outras características importantes, como amplitude e frequência dos ciclos.

As funções trigonométricas, especificamente seno e cosseno, dependendo como tratadas num modelo, podem ser consideradas lineares ou não-lineares, caso uma mudança de variável seja realizada. Neste aspecto, têm-se duas hipóteses para uma dada série temporal (MORETTIN, 2004):

- conhecem-se as frequências em que os ciclos ocorrem e, como incógnitas, deseja-se estimar as amplitudes e fases desses ciclos;

- nenhuma informação a respeito de amplitude, frequência e fase da série são conhecidas a priori.

O primeiro caso ocorre menos frequentemente que o segundo, pois uma informação a priori é necessária, o que comumente não se tem. Em uma análise inicial, muitas vezes, a determinação desses parâmetros por outros meios (gráficos) é muito difícil devido à sobreposição de informações e à presença de ruídos. Os casos em que um dos parâmetros é conhecido pode simplificar a determinação dos demais.

Considerando as duas hipóteses acima e, supondo que uma série temporal possa ser parcial ou totalmente modelada por funções trigonométricas, duas linhas de estudo são possíveis. A primeira está relacionada à característica do modelo fundamental a ser ajustado, por exemplo:

$$x = a \cos(\omega t + \phi); \quad (13)$$

sendo:

- x = valor da série em dado instante;
- a = amplitude do termo trigonométrico;
- ω = velocidade angular, igual a $2\pi f$ com f sendo a frequência;
- ϕ = fase inicial.

Esse modelo constitui as parcelas do modelo utilizado para descrever a série na forma de uma soma de funções trigonométricas, dado por (MORETTIN, 2004):

$$f(t) = \sum (a_i \cos(\omega_i t) + b_i \sin(\omega_i t)) \quad (14)$$

O procedimento para estimar os parâmetros consiste na minimização da norma dos resíduos. Quando o modelo adotado é linear, a obtenção dos parâmetros é simples. Neste caso, valores aproximados e iterações não são necessários.

A função expressa pela Equação 13 pode ser considerada linear, desde que o argumento da função trigonométrica seja conhecido e fixado (MORETTIN, 2004; AMIRI-SIMKOOEI, TIBERIUS e TEUNISSEN, 2007). Caso esse elemento seja incógnito, a solução

pode ser crítica quando não se têm valores aproximados para esse parâmetro, sendo adequado tratar esse caso usando a Transformada de Fourier para realizar uma análise espectral.

3.4.3.1 Análise Espectral de Fourier ou harmônica

Diversas áreas da ciência têm como objeto de estudo sinais provenientes de instrumentos de medida. Essas medidas podem ser de temperatura, pressão, por exemplo, se estiverem relacionadas ao campo da Meteorologia. Outras aplicações estão presentes na vida diária de grande parte das pessoas. Na compactação de imagem e som, a técnica de decomposição de sinais é muito utilizada para reduzir o tamanho desses dados. A diferença está na dimensão espacial do sinal. Em muitos casos tem-se utilizado a transformada do cosseno para decompor estes sinais em componentes espectrais. Algumas técnicas de compactação de áudio eliminam componentes não audíveis, diminuindo o número de componentes espectrais e, conseqüentemente, o espaço para armazenamento do sinal.

A decomposição de sinais em série de funções trigonométricas ou série de Fourier consiste na seguinte combinação de sinais na forma dada na Equação 15, semelhante à apresentada anteriormente:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \quad (15)$$

Os elementos a_0 , a_n e b_n são denominados coeficientes de Fourier. São obtidos por:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx ; \quad (16)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx . \quad (17)$$

O termo a_0 é obtido como:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx . \quad (18)$$

Em Santos (1992b) é apresentada uma análise de séries temporais artificiais. São apresentadas as componentes espectrais que formam o sinal, o qual é decomposto em séries trigonométricas após processamento.

Uma das deficiências da análise via Transformada de Fourier é que ela não detecta características locais do sinal, pois basicamente considera a presença de harmônicos por todo o sinal no processo de análise, decompondo-o apenas no espaço de frequências. Por apenas utilizar funções periódicas não limitadas e infinitas para descreverem uma função (sinal), algumas características periódicas são negligenciadas. Como consequência disso, a transformada acaba apresentando um comportamento global médio, fornecendo apenas uma análise frequencial, não temporal (OLIVEIRA, 2007). Contudo, de acordo com Morettin (2004), mesmo que os dados não apresentem periodicidades, a Análise Harmônica é útil para analisá-los em componentes harmônicas periódicas.

Uma ferramenta matemática alternativa que não possui as deficiências apresentadas refere-se à análise por *wavelets*, a qual é descrita na próxima seção.

3.4.3.2 Análise de séries temporais usando *wavelets*

A análise de sinais por meio de *wavelets* consiste em decompor um sinal em componentes dentro do espaço de frequências e tempo. Na análise de *wavelets*, são utilizadas funções *wavelets* limitadas, cuja energia é restrita a um intervalo finito. Essa característica é conhecida por suporte compacto e permite a localização espacial na análise.

Existem diversas funções *wavelets* de suporte compacto e, uma vez escolhida uma dessas funções, conhecida como *wavelet* mãe ou *wavelet* base, a análise de *wavelets* é realizada a partir de translações e dilatações (compressões) dessa *wavelet* base.

Dentre as *wavelets* existentes, cada tipo aplica-se a uma determinada finalidade, apresentando um desempenho superior em algumas situações. Segundo Christopoulou (2002), a *wavelet* de Morlet, dada pela Equação 19 (TORRENCE e COMPO, 1998):

$$\psi_0(n) = \pi^{\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 n} e^{-\eta^2/2} \quad (19)$$

onde ω_0 a frequência não-dimensional, é a *wavelet* mais apropriada para análise de séries temporais provenientes de situações do mundo real.

Na Figura 15 é apresentado o gráfico, no domínio temporal e de frequências, da função apresentada na Equação 19.

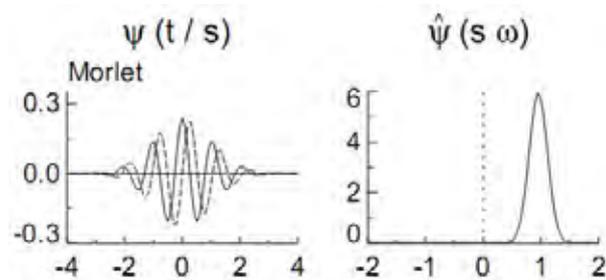


Figura 15 - *Wavelets* base de Morlet

(Adaptado de Torrence e Compo, 1998)

Na Figura 15, no gráfico da função *wavelet* de Morlet, nota-se a característica de ser uma função de suporte compacto, isto é, toda a energia dessa *wavelet* está restrita a um intervalo limitado, finito, ou seja, a função é exatamente nula fora desse intervalo e, nesse caso, diz-se que as *wavelets* têm localização espacial. Essa propriedade, de fundamental importância, faz com que no processo de convolução da função *wavelet* com o sinal, essa se adapte mediante a esticamentos ou encolhimentos bem como variação na sua escala.

A análise de *wavelets* pode ser utilizada para analisar séries temporais que contenham energia não-estacionária em diferentes frequências. Nesse sentido, a série temporal é decomposta em componentes de diversas frequências e escalas para obter o espectro de *wavelets*. A partir desse espectro, informações desconhecidas da série são reveladas, ou seja, é possível conhecer as frequências predominantes e onde elas ocorrem no tempo, o que não é possível com a análise de Fourier. Para aplicação da análise de *wavelets* assume-se que a série temporal seja igualmente espaçada no tempo (TORRENCE e COMPO, 1998).

3.5 Remoção de efeitos de tendência e sazonalidade utilizando o ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados

Nesta seção são descritos os modelos matemáticos para remoção de efeitos de tendência e sazonalidade presente em séries temporais.

3.5.1 Modelo matemático

Os efeitos presentes nas séries temporais podem ser removidos mediante o ajustamento de uma função adequada aos dados. O vetor de resíduos do processo de ajustamento corresponde à série filtrada dos efeitos considerados no modelo matemático. A escolha do modelo matemático apropriado geralmente é feita com base no conhecimento de algumas hipóteses, ou seja, considerando que a série esteja eivada de um deslocamento, uma tendência e efeitos de natureza cíclica. Pode-se acrescentar uma parcela representando os saltos presentes na série devido à substituição de antena, receptor, eventos geofísicos (sismos) etc. Na Equação 20 é apresentado o modelo matemático que leva em consideração esses efeitos (NIKOLAIDIS, 2002):

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + v_i \quad ; \quad (20)$$

onde a e b representam os coeficientes linear e angular da reta, respectivamente. Os coeficientes c e d representam a amplitude dos efeitos anuais. Os coeficientes e e f representam a amplitude dos efeitos semi-anuais. H é a função salto de Heaviside (WEISSTEIN, 2008; BRACEWELL, 2000) e v_i representando os efeitos não modelados, considerados como sendo efeitos residuais.

Um modelo matemático utilizado para remoção dos efeitos de tendência e sazonalidade mais simples é apresentado na Equação 21 (AMIRI-SIMKOOEI, TIBERIUS, TEUNISSEN, 2007; CHATFIELD, 1984):

$$y_n(t) = y_0 + rt + \sum_{k=1}^m a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t); \quad (21)$$

onde y_0 e r representam os coeficientes linear e angular da reta. Os coeficientes a_k e b_k representam as amplitudes dos termos harmônicos do cosseno e seno, respectivamente. O argumento ω_k das funções trigonométricas é dado por $\omega_k = 2k\pi$. Cada elemento da série temporal é representado por $y_n(t)$.

Os modelos matemáticos apresentados na Equação 20 e Equação 21 são similares, atuando de maneira idêntica desde que a série temporal esteja livre dos saltos devido a eventos específicos na estação GPS. Uma particularidade desses modelos é que ambos possuem uma estrutura linear.

3.5.2 Ajustamento das observações: filtragem de sinal

No processo de ajustamento, as matrizes envolvidas são obtidas da derivação do modelo matemático adotado. Considerando a Equação 21, a matriz Jacobiana correspondente é apresentada, de forma geral, considerando $m=1$:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1(t)}{\partial y_0} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial r} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial a_k} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial b_k} \\ \dots & & & \\ \frac{\partial y_n(t)}{\partial y_0} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial r} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial a_k} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial b_k} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Considerando que além de efeitos anuais existem ainda os de natureza semi-anual, a matriz A apresentada na Equação 22 deve ser desenvolvida no que diz respeito à parcela referente ao operador matemático somatório, com $m=2$. Com isso, a estrutura da matriz *design* é alterada quanto ao número de colunas, devido ao aumento de mais dois parâmetros para serem estimados. Na Equação 23 é apresentada a matriz expandida:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1(t)}{\partial y_0} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial r} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial a_1} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial b_1} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial a_2} & \frac{\partial y_1(t)}{\partial b_2} \\ \dots & & & & & \\ \frac{\partial y_n(t)}{\partial y_0} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial r} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial a_1} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial b_1} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial a_2} & \frac{\partial y_n(t)}{\partial b_2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Desenvolvendo as derivadas parciais na Equação 23, obtém-se a matriz *design* apresentada na Equação 24:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \cos(2\pi t_1) & \sin(2\pi t_1) & \cos(4\pi t_1) & \sin(4\pi t_1) \\ \dots & & & & & \\ 1 & t_n & \cos(2\pi t_n) & \sin(2\pi t_n) & \cos(4\pi t_n) & \sin(4\pi t_n) \end{bmatrix} \quad (24)$$

A solução dos parâmetros é obtida resolvendo a Equação 25 (GEMAEL, 1994):

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L, \quad (25)$$

onde:

$$V = AX + L \quad (26)$$

$$L = L_0 - L_b. \quad (27)$$

Com L_b contendo as observações e L_0 o vetor das observações a partir dos parâmetros aproximados, obtido substituindo os valores aproximados nos parâmetros no modelo matemático. Por simplicidade, está se assumindo que a matriz P (peso) é igual à identidade, o que não é uma opção totalmente adequada.

Ao final do processo de ajustamento das observações, o vetor dos resíduos V contém o sinal resultante do processo de filtragem pelo MMQ, consistindo do sinal original subtraído das componentes tendência e sazonalidades (anual e semi-anual).

A qualidade do ajustamento pode ser obtida mediante um estimador calculado com base no vetor dos resíduos, ou seja, representa um indicador global, que tende a diminuir quanto melhor for o ajuste do modelo aos dados. O fator de variância a posteriori $\hat{\sigma}^2$ é dado pela Equação 28 (GEMAEL, 1994):

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{V^T V}{n - u}. \quad (28)$$

Na Equação 28, a diferença no denominador é denominada graus de liberdade, sendo que os valores para n são dados pelo número de observações que foram consideradas no processo de ajustamento das observações para estimar os u parâmetros do modelo matemático adotado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram processados os dados de algumas estações equipadas com receptores GPS, as quais fazem parte da RBMC. A escolha dessas estações foi realizada com base em alguns requisitos, sendo alguns deles baseados em resultados de pesquisas anteriores, período de dados coletados, particularidades da região, entre outros critérios que serão apresentados no decorrer desse capítulo. No que diz respeito aos erros presentes no posicionamento por ponto preciso, a maior parte foi levada em consideração em todos os processamentos. Quanto aos efeitos de 2ª e 3ª ordem, esses tiveram seus efeitos removidos pelo *software* “RINEX_HO (RINEX HIGHER-ORDER)”, desenvolvido por Marques (2008). O processamento das observáveis GPS foi realizado pelo *software* NRCan’s *Precise Point Positioning* (NRCanPPP) cujos detalhes e configurações serão apresentados.

4.1 Materiais

Nos experimentos foram utilizados os dados coletados por receptores GPS da marca Trimble, modelos 4000SSI e NetRS, preferencialmente, instalados nas estações da RBMC. Nesta pesquisa, os dados coletados pelas estações NAUS, BRAZ e BRFT foram utilizados nos experimentos. Para outras estações a metodologia a ser aplicada é similar. Na Figura 16 é apresentada a distribuição espacial dessas estações bem como o clima e hidrografia.

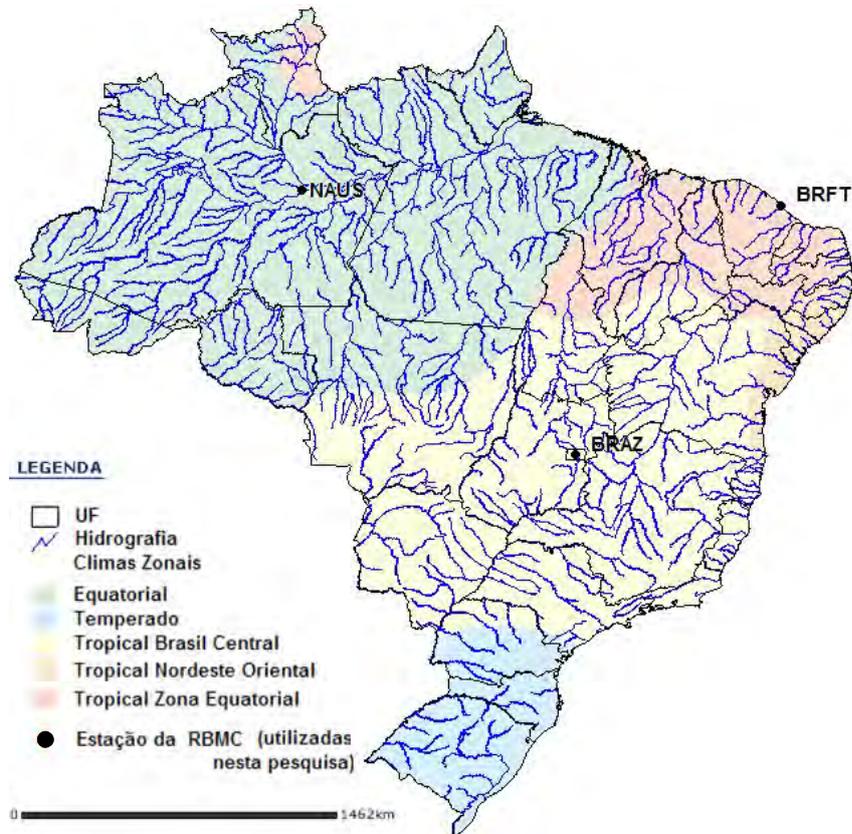


Figura 16 - Localização das estações utilizadas nos experimentos. O clima predominante e a hidrografia do país
(Fonte: IBGE, 2008a)

A escolha de tais estações se deve ao fato de estarem localizadas em diferentes regiões no país, com características diferenciadas, conforme pode ser visto na Figura 16. A estação NAUS está localizada numa região com grande concentração de rios que durante as cheias cobrem uma vasta extensão da região central da Amazônia.

A estação de BRFT está localizada numa região muito próxima ao litoral onde se acredita que os efeitos de marés oceânicas são acentuados, conforme apresentado na Figura 8 (Seção 2.3.15).

No caso da BRAZ, é uma estação localizada praticamente no centro da placa litosférica sul-americana (Figura 17) e também afastada do litoral, de forma que o efeito das marés oceânicas é mínimo.

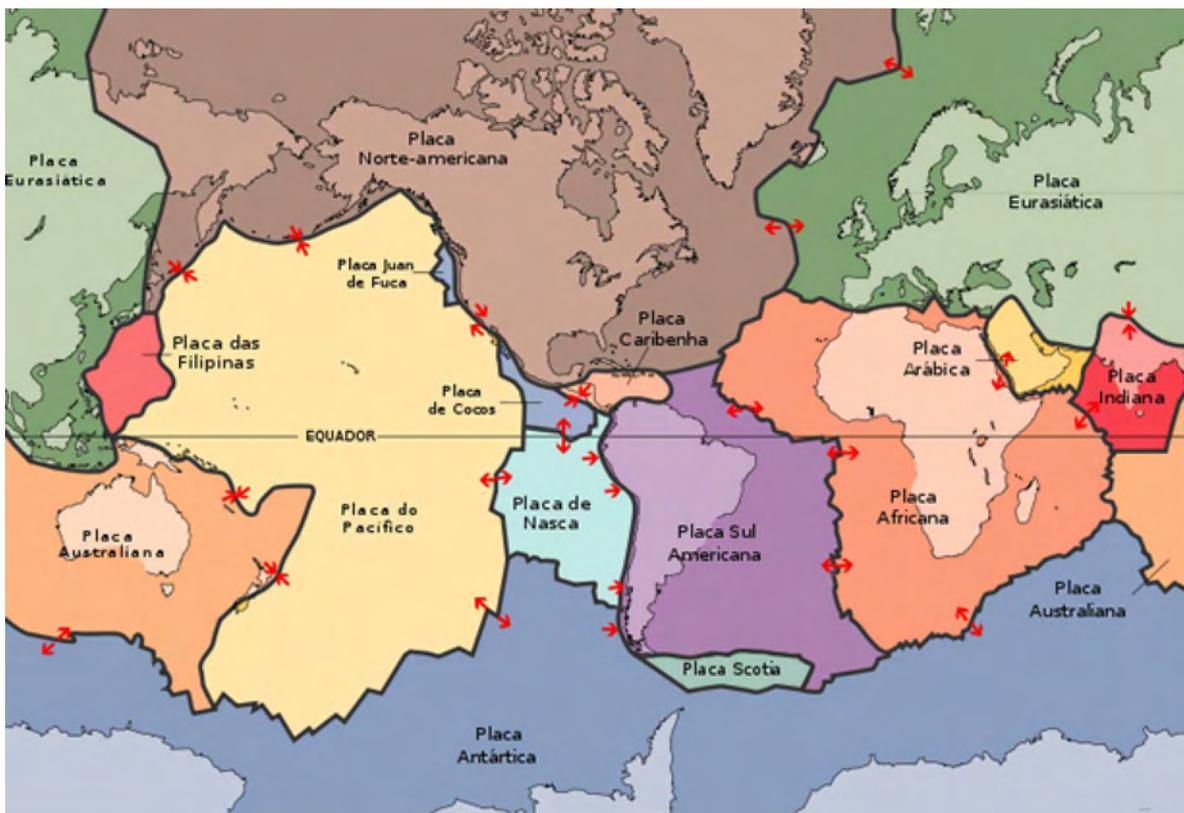


Figura 17 – Distribuição das placas litosféricas

(Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Placas_tect2_pt_BR.svg)

4.2 Metodologia proposta

A metodologia, em linhas gerais, segue três etapas principais:

- 1) Obtenção dos dados e metadados para criação do banco de dados de informações das estações utilizado pelo *software* de processamento;
- 2) Processamento dos dados e extração dos resultados;
- 3) Análise dos resultados, que constituem as séries temporais, obtidos do processamento.

As estações GPS, como as pertencentes à RBMC, possuem um grande volume de dados armazenados. No que se refere aos dados utilizados nesta pesquisa, foram usados os pertencentes às estações com mais de 2 anos, com registro de todos os eventos que ocorreram dentro deste período, desde a troca de *firmware* do receptor, substituição do próprio receptor e/ou antena ou casos como desativação da estação. Informações atualizadas podem ser encontradas em IBGE (2008). Essas informações são de extrema importância nas etapas de processamento dos dados e na análise das séries temporais de cada estação. Conclusões errôneas e tendenciosas podem ser obtidas quando não considerados tais eventos.

O acesso aos dados GPS é realizado por meio de acesso FTP ao servidor IBGE. Atualmente os dados encontram-se 99% íntegros, porém devido a questões técnicas, alguns arquivos também tiveram que ser solicitados ao IBGE. Arquivos incompletos, corrompidos durante o processo de armazenamento, inexistentes, foram algumas das causas.

A partir dessas informações de disponibilidade é possível traçar as funções que o sistema de processamento deverá desempenhar. Uma dessas funções está relacionada à edição dos arquivos RINEX, que em diferentes épocas possuem informações de cabeçalho atualmente consideradas desatualizadas, não respeitando as convenções propostas pelo IGS, principalmente as relacionadas a nome de antena e receptor. Após a edição, preparação de diretório e verificação de arquivos auxiliares o volume de dados é processado usando o *software* NRCan PPP.

Durante o processamento dos dados, as efemérides precisas produzidas pelo IGS são utilizadas juntamente com o arquivo de correções dos relógios dos satélites.

A obtenção das séries temporais requer um trabalho repetitivo para processamento dos dados, sendo quase inviável o processamento individual. Dessa forma, rotinas em *shell script* foram desenvolvidas para automatizar o processo de organização dos dados, processamento e tabulação, ficando o usuário responsável pela análise.

4.3 Software de processamento de dados GPS

Nos experimentos, utilizou-se o *software* NRCanPPP, desenvolvido pelo NRCan e recentemente obtido pela FCT/UNESP. Os modelos para a determinação de efeitos externos (funções de mapeamento, modelos troposféricos, carga de marés oceânicas, marés terrestres, rotação da fase), que afetam o sinal proveniente dos satélites GPS como também a própria estação, encontram-se implementados no NRCanPPP. Na Tabela 4 são apresentadas as principais fontes de erro bem como as soluções adotadas nesse *software* para minimizá-las.

Tabela 4 - Principais fontes de erros e modelos para correção (adotados no processamento)

Fonte de erro	Solução aplicada
Marés terrestres	Love e Shida
Marés oceânicas	GOT00.2
Variação do centro de fase das antenas	Correções absolutas do IGS
Erro do relógio dos satélites	Correções geradas pelo IGS

Erro das coordenadas dos satélites	Efemérides precisas do IGS
Velocidades das coordenadas	Velinter
Troposfera (Componente hidrostática)	Hoppfield
Troposfera (Componente úmida)	Estimada durante o processamento
Ionosfera (Efeitos de primeira ordem)	Combinação linear <i>ionosphere free</i>
Ionosfera (Efeitos de 2ª e 3ª ordem)	Não implementado

Referente às soluções apresentadas na Tabela 4, ressalta-se que os erros dos relógios dos satélites podem ser obtidos de duas maneiras. Isso se deve ao fato do IGS calcular e disponibilizar esses erros juntamente com as efemérides, com intervalos entre as correções de 15 minutos, e também fornecer um arquivo contendo apenas a correção para esse erro, dadas em intervalos de 5 minutos. Contudo, somente a partir da semana 1087 (IGSMail 3087) esses produtos passaram a ser disponibilizados, logo todos os processamentos de dados coletados antes de 5 de novembro de 2000 não puderam tirar proveito de tais correções. Essa informação é importante, pois o *software* utilizado nesta pesquisa estima os parâmetros envolvidos no processamento segundo o intervalo das informações de relógio. Os arquivos de efemérides como correções dos relógios dos satélites podem ser encontrados no endereço de FTP de acesso público <ftp://igsb.jpl.nasa.gov>.

4.4 Processamento dos dados

Para realizar o processamento dos dados no *software* NRCanPPP, a fim de obter apenas uma coordenada diária, foram identificados e definidos os modelos e parâmetros necessários.

No que diz respeito às coordenadas iniciais para o processamento, foram utilizadas aquelas oficiais disponibilizadas pelo IBGE. Foi necessário desenvolver um *software* em linguagem FORTRAN que atualizasse tais coordenadas usando as velocidades obtidas pelo *software* Velinter *online* (<http://sirgas.igm.gov.ar/igm2/velinter/index.php?ft=1>).

Além dos procedimentos e as informações necessárias para iniciar o processamento, o *software* GPSPPP precisa obter os parâmetros relacionados a cada arquivo de observações GPS, um por vez e de maneira interativa, bem como o nome do arquivo de efeméride precisa e relógio correspondente. Esse último pode ser necessário, caso a opção no arquivo de controle do *software* esteja ativada. Detectados esses problemas, a solução foi adotar arquivos de entrada para cada processamento, contendo os nomes e opções necessárias.

Com relação à estrutura do arquivo de controle, a Tabela 5 apresenta um exemplo. Nota-se que algumas configurações permitem ao usuário habilitar ou não o uso de certas correções.

Tabela 5 - Exemplo de arquivo de controle utilizado pelo *software* GPSPPP

```
' UT DAYS OBSERVED (1-15):' 1
' USER DYNAMICS (1=STATIC,2=KINEMATIC)' 1
' OBSERVATION TO PROCESS (1=COD,2=C&P)' 2
' FREQUENCY TO PROCESS (1=L1,2=L2,3=L3)' 3
' SATELLITE EPHEMERIS INPUT (1=BRD ,2=SP3)' 2
' SATELLITE PRODUCT (1=NO,2=PrCclk,3=MRTCA)' 2
' SATELLITE CLOCK INTERPOLATION (1=NO,2=YES)' 1
' IONOSPHERIC GRID INPUT (1=NO,2=YES)' 1
' SOLVE STATION COORDINATES (1=NO,2=YES)' 2
' SOLVE TROP. (1=NO,2-5=RW MM/HR) (+100=grad) ' 5
' BACWARD SUBSTITUTION (1=NO,2=YES)' 2
' REFERENCE SYSTEM (1=NAD83,2=ITRF)' 2
' COORDINATE SYSTEM(1=ELLIPSOIDAL,2=CARTESIAN)' 2
' A-PRIORI PSEUDORANGE SIGMA (m)' 1.000
' A-PRIORI CARRIER PHASE SIGMA (m)' 0.010
' LATITUDE (ddmmss.sss,+N) or ECEF X (m)' 3687624.371
' LONGITUDE (ddmmss.sss,+E) or ECEF Y (m)' -4620818.727
' HEIGHT (m) or ECEF Z (m)' -2386880.292
' ANTENNA HEIGHT (m)' 0.003
' CUTOFF ELEVATION (deg)' 10.000
' GDOP CUTOFF ' 20.000
```

Os parâmetros meteorológicos como temperatura, pressão, umidade relativa e fator de escala para a troposfera podem ser informados interativamente pelo usuário ou utilizados os valores padrões calculados pelo *software*. Estes valores são computados com base em modelos disponíveis no *software*.

Recebidos todos os parâmetros de entrada o *software* inicia o processamento, gerando os arquivos de resultados. A Tabela 6 apresenta as saídas de um arquivo de log resumido do processamento realizado.

Tabela 6 - Exemplo de saída do *software* GPSPPP

```
-----
GPS Precise Point Positioning (CSRS-PPP ver. 1.04/1087/2007-04-18)
Natural Resources Canada, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada
615 Booth Street, room 440, Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0E9
Phone: (613) 995-4410, fax: (613) 995-3215
Email: information@geod.nrcan.gc.ca
-----
+Enter MEASUREMENT input file name :
+Enter COMMAND file name :

THE FOLLOWING OPTIONS WERE READ FROM FILE ppte0291.cmd

>>>> PARAMETROS APRESENTADOS NA TABELA 5

ENTER OPTION AND NEW VALUE (0,0 TO CONTINUE)
UPDATE COMMAND FILE (Y/N)?
1. Temperature (deg C) 20.000
```

```

2. Pressure (Mb) 961.877
3. Relative humidity (%) 50.000
4. Tropospheric scale 1.000
ENTER OPTION AND NEW VALUE (0,0 TO CONTINUE)
Enter PRECISE EPHEMERIS file name for 08/01/29 :
Enter SATELLITE CLOCK file name for 08/01/29 :
FLT 20 500 200 5000 300 0 1 1 1 25 0

PRE-PROCESSING PRECISE SATELLITE CLOCKS

TEMP, PRES, RH 20. 961.877033 50. 2.19548712 0.112261151

SORTING EPHEMERIS FILE 0 64 60 20 30 70

INITIAL EPOCH PROCESSING
GDOP,DOPMAX,NSVO,VTVPR 2.45283288 20. 10 0.762614212
SOLUTION VALID
XRVCOR,CORMAX 0.472060071 100.
RESETTING INIPX
REACHED END OF FILE FOR SAT 5
....
REACHED END OF FILE FOR SAT 31
REACHED EOF, SAVE AND RESET FILTER COUNTERS
REACHED END OF FILE FOR SAT 21
....
REACHED END OF FILE FOR SAT 24
*END - NORMAL COMPLETION

```

Os resultados necessários para esta pesquisa são registrados em arquivos criados no mesmo diretório de processamento. Estes contêm informações detalhadas do processamento como também as informações de entrada para um processamento de um dia subsequente. Na Tabela 7 são apresentados detalhes a respeito de cada arquivo criado pelo *software*, como também aqueles utilizados antes do processamento para fins de configuração. Para exemplificar, serão utilizados os nomes adotados no processamento realizado para a estação PPTE, cujos dados foram coletados em 29 de janeiro de 2008 (029-2008). Os nomes utilizados também são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Descrição dos arquivos utilizados e gerados no processamento

Arquivos de dados	Conteúdo
ppte0291.08o	Arquivo RINEX de observação, contendo as observáveis registradas pelo receptor GPS.
ppte0291.ipx	Arquivo binário contendo as equações normais do processamento realizado. No NRCanPPP, pode-se utilizar esse arquivo como informações sobre os parâmetros em um processamento posterior para a mesma estação.
Arquivos de	Conteúdo

configurações	
gpsppp.trf	Parâmetros de transformação NAD83-ITRF.
gpsppp.svb	Arquivo com informações da constelação de satélites GPS, correções CA-P1 etc.
gpsppp.pcv	Correções da variação do centro de fase das antenas.
gpsppp.olc	Coefficientes do modelo de marés oceânicas.
gpsppp.met	Dados meteorológicos de superfície (pressão, temperatura, umidade relativa).
gpsppp.flt	Lista dos diversos parâmetros de processamento.
gpsppp.def	Lista de definições de nomes, cabeçalho e idioma.
Arquivos de resultados	Conteúdo
ppte0291.cmd	Informações iniciais para o processamento.
ppte0291.inp	Arquivo para execução automática (não interativa).
ppte0291.ipx	Equações normais resultantes do processamento atual.
ppte0291.pos	Posições estimadas e precisões.
ppte0291.res	Resíduos dos parâmetros estimados.
ppte0291.ses	Parâmetros usados na sessão de processamento atual.
ppte0291.sum	Sumário de processamento.
ppte0291.log	Registro da saída padrão do <i>software</i> (sem exibição em tela).

Na Tabela 7, alguns dos arquivos de configuração foram obtidos junto aos centros responsáveis pela sua disponibilização, caso das correções absolutas do centro de fase das antenas (igs_05.atx), coeficientes do modelo de marés oceânicas (GOT-00.2) e correções relacionadas aos satélites (Identificação, período de existência, correções CA-P1 etc).

Foram elaborados programas para realizarem as tarefas de organização de pastas e arquivos, facilitando posteriormente o processamento e extração de resultados. Todas as informações geradas são preservadas a cada processamento, podendo ser úteis na verificação dos parâmetros utilizados.

4.5 Análise das séries temporais

A partir das coordenadas cartesianas geodésicas (X, Y, Z) obtidas do processamento, como também suas respectivas precisões, foi efetuada a análise das coordenadas após essas terem sido transformadas para um sistema de referência local, representadas pela terna (Leste, Norte, Vertical). As coordenadas diárias estimadas para cada componente durante um determinado período representam as séries temporais, as quais são objetos de estudo nesta pesquisa. Algumas características das séries temporais, como a tendência e sazonalidade, são determinadas computacionalmente por meio de aplicativos apropriados. Para a análise de tendência, foi implementado o MMQ conforme a metodologia descrita na seção 3.4.1. Já para a análise da sazonalidade foi utilizado o *toolbox* desenvolvido por Torrence e Compo (1998). Esse *toolbox* permite realizar a análise de *wavelets*, descrita na seção 3.4.2.2. Dessa forma, as séries temporais são decompostas e as informações referentes à periodicidade de cada série podem ser obtidas. Nesse passo, essas informações são aplicadas no argumento ω_k , referente à frequência, do modelo matemático simplificado que é apresentado na Equação 21 (seção 3.5.1), tornando possível a remoção dos efeitos de sazonalidade da série.

De forma geral, são utilizadas duas ferramentas matemáticas integradas: *wavelets* e estimativa pelo MMQ. A primeira delas proporciona a frequência com que determinado fenômeno ocorre bem como sua localização no tempo. Já a segunda permite estimar os parâmetros que descrevem a série temporal no que diz respeito à amplitude do efeito, pois a frequência de ocorrência passa a ser injuncionada assim que obtida por *wavelets*. Dessa forma, os efeitos citados podem ser removidos.

5 EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Os dados das três estações da RBMC, localizadas em Manaus, Brasília e Fortaleza foram processados utilizando o *software* NRCanPPP no modo PPP, com as configurações apresentadas na Tabela 6. Como fora descrito na metodologia, as coordenadas para cada dia foram estimadas durante o período em que havia dados disponíveis. A partir do valor médio obtido dessas coordenadas, foram calculadas as discrepâncias diárias da terna (X, Y, Z) e posteriormente transformadas para um sistema geodésico local cuja origem foi definida como sendo a média das coordenadas da série. Como resultados obtiveram-se as variações nas componentes Leste (E), Norte (N) e Vertical (Up).

Neste capítulo são apresentados os experimentos e as análises realizadas, tratando da remoção dos efeitos de tendência e sazonalidade presentes nas séries temporais das coordenadas.

5.1 Estação Manaus (NAUS)

As informações gerais da estação NAUS são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Informações da estação NAUS

Estação: NAUS (Manaus – AM)
Período dos dados: 01 de janeiro de 2006 a 31 de janeiro de 2008.
Receptor: Trimble NetRS
Antena: TRM41249.00 NONE

Os dados referentes à estação NAUS foram processados no modo PPP utilizando as correções de marés oceânicas, marés terrestres e correções absolutas para a variação do centro de fase da antena. Para a modelagem da troposfera o modelo de Hopfield foi empregado. Na Figura 18, Figura 19 e Figura 20 são apresentadas as séries temporais das coordenadas diárias, representadas no sistema local, tendo como origem o valor médio calculado.

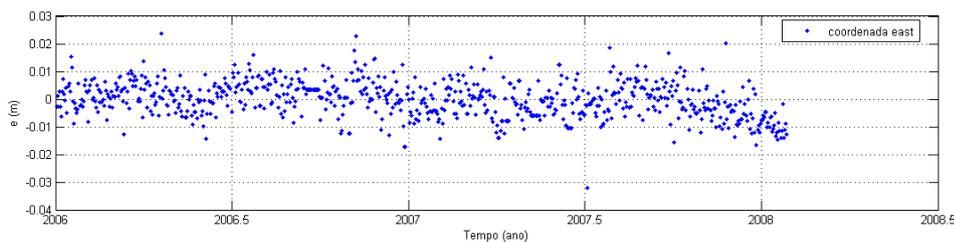


Figura 18 - Componente Leste

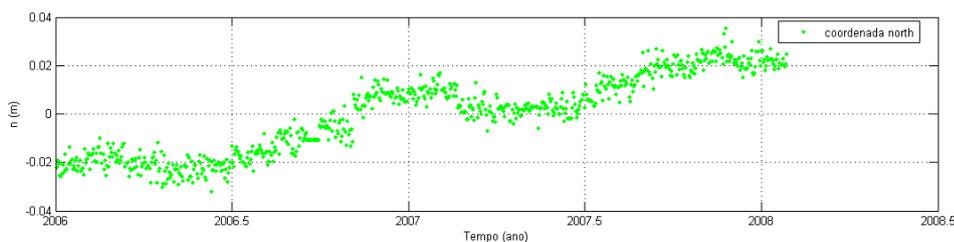


Figura 19 - Componente Norte

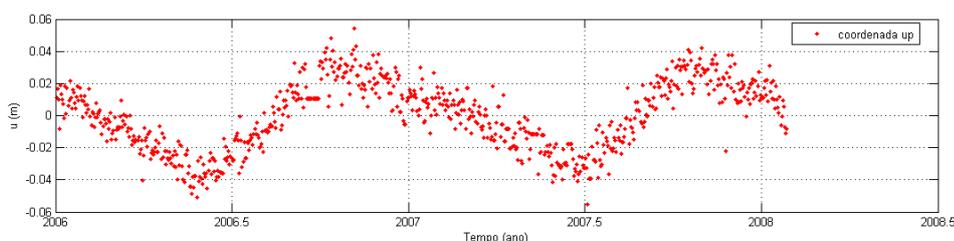


Figura 20 - Componente Vertical

Verifica-se que a componente Leste praticamente não apresenta efeitos periódicos. O mesmo não pode ser afirmado para a componente Norte que, além de apresentar uma tendência linear, um efeito sazonal também pode ser notado. Contudo, o maior efeito sazonal está praticamente concentrado na componente Vertical, fato também apresentado em Bevis, (1998), Amiri-Simkooei, Tiberius, Teunissen (2007) e Amiri-Simkooei (2008). Dessa forma, a componente Vertical será analisada primeiramente por apresentar o maior efeito.

5.1.1 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Vertical

A remoção do efeito de tendência e das componentes sazonais das séries temporais foi realizada mediante um ajuste pelo MMQ usando o modelo matemático apresentado na Equação 21 (seção 3.5.1). Em relação às componentes sazonais, considerou-se presente na série um efeito de período anual e semi-anual, da mesma forma como apresentado em Amiri-Simkooei, Tiberius e Teunissen (2007) e Nikolaidis (2002).

Conforme descrito na metodologia (seção 4.5), a análise de *wavelets* é a ferramenta ideal para decompor a série temporal e, a partir do espectro de *wavelets*, obter informações sobre a periodicidade da mesma. Dessa forma, na Figura 21 é apresentado o espectro de *wavelets* correspondente à componente Vertical.

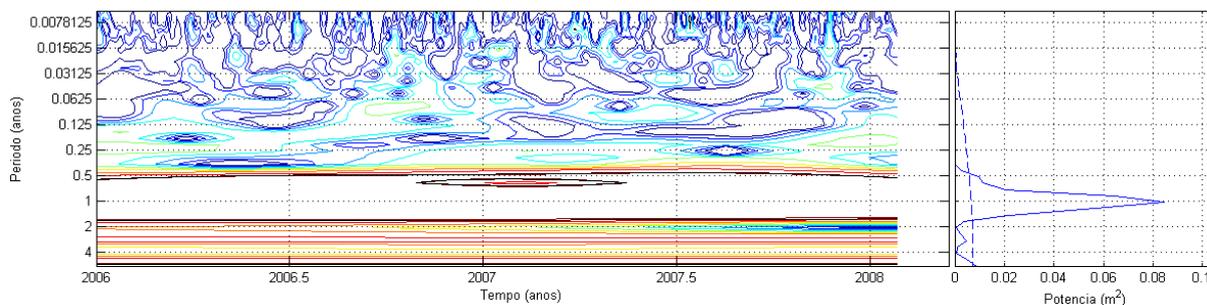


Figura 21 - Espectro de *wavelets* para a componente Vertical

Na Figura 21 nota-se um efeito de sazonal com período de um ano, que está presente em toda a série. Tendo por base o período apresentado no espectro, foi removido esse efeito anual utilizando o ajuste da curva da Equação 21 com a constante k sendo definida igual a 1. Na Figura 22 é apresentada a curva ajustada, como também os resíduos do ajuste, representando as medidas sem o efeito anual.

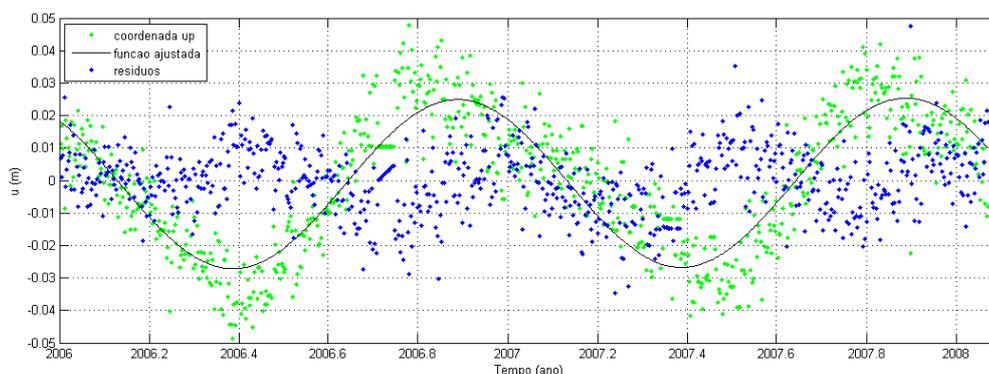


Figura 22 – Série temporal da componente Vertical e curva ajustada

Analisando a Figura 22, nota-se que nos resíduos ainda permanece um efeito periódico de menor magnitude que o anual. A Figura 23 apresenta o espectro de *wavelets* da série temporal dos resíduos apresentados na Figura 22, ou seja, da componente Vertical com o efeito anual removido.

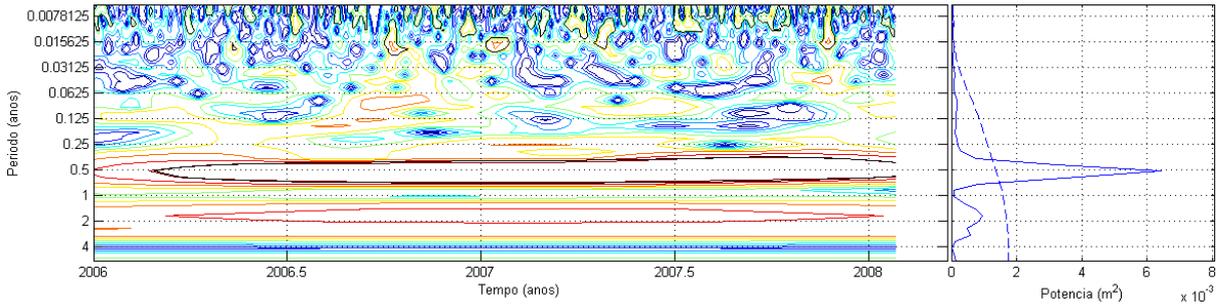


Figura 23 - Espectro de *wavelets* para a componente Vertical com efeito anual removido

Na Figura 23 constata-se uma considerável redução do espectro de potências, revelando outras características do sinal que estavam “ocultas” devido à grande magnitude do efeito anual removido. Nota-se que um efeito semi-anual está presente na série e para removê-lo foi utilizado o procedimento de ajuste da curva da Equação 21 com a constante k sendo definida igual a 2, ou seja, o mesmo procedimento adotado para remoção do efeito de anual, porém com mais um período a ser removido. Como resultado, obteve-se a série apresentada na Figura 24.

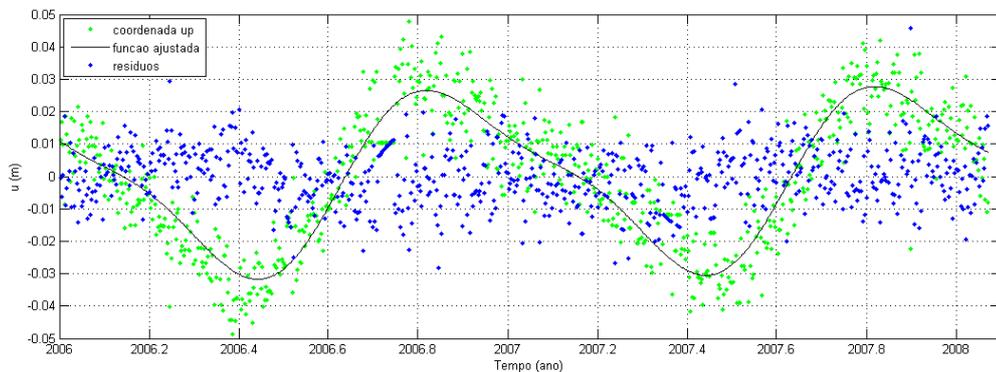


Figura 24 - Componente Vertical com efeitos anual e semi-anual removidos

Com a remoção dos efeitos anual e semi-anual presente na série da componente Vertical, foi aplicado novamente a análise de *wavelets* que gerou o espectro apresentado na Figura 25. Outras características periódicas de menor potência que ainda ficaram presentes no sinal foram reveladas.

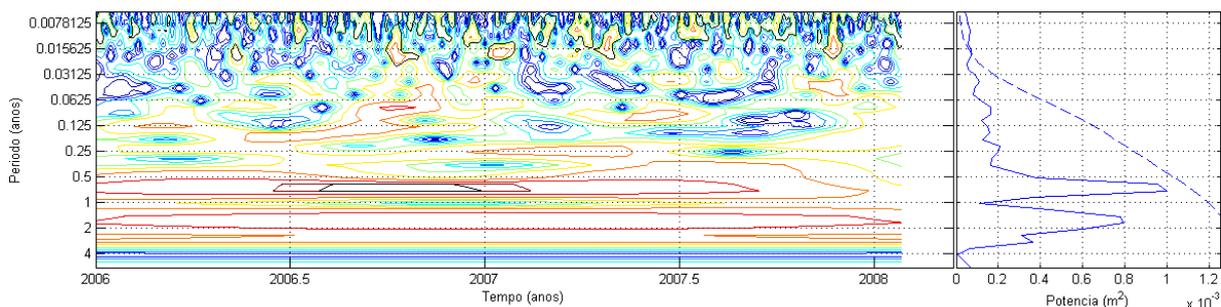


Figura 25 - Espectro de *wavelets* para a componente Vertical sem os efeitos anual e semi-anual

No que diz respeito à qualidade do processo de remoção dos efeitos,) foi estimado em cada passo realizado (remoção da tendência, remoção do efeito anual e remoção do efeito semi-anual) o fator de *variância a posteriori* para verificar se o comportamento desse fator poderia ser útil como um indicador da qualidade do ajustamento do modelo adotado. Na Tabela 9 são apresentados os valores calculados.

Tabela 9 - Fator de variância a posteriori para cada etapa de remoção de efeitos na série temporal

Remoção de efeito	Fator de <i>variância a posteriori</i>
Tendência linear	3,7737e-5
Sazonal anual	3,5138e-5
Sazonal anual e semi-anual	3,4202e-5

Nota-se que à medida que os efeitos passam a ser considerados como parâmetros no modelo ajustado há uma pequena diminuição do estimador *fator de variância a posteriori*.

Acredita-se que os picos remanescentes apresentados na Figura 25 sejam devidos a deficiências na modelagem dos erros no processamento dos dados.

Considerando a localização dessa estação, uma região com um sistema de rios e afluentes que durante o ano afetam a região com as enchentes e vazantes, os resultados mostram-se semelhantes àquele apresentado em Beavis (2005). Nesse trabalho, os resultados referentes à componente vertical apresentaram-se correlacionados com as medidas do limnógrafo instalado em Manaus (AM), fato também constatado nesta pesquisa, conforme apresenta a Figura 26. A Figura 26 foi criada a partir dados limnográficos obtidos em <http://hidroweb.ana.gov.br>, para a estação Manaus (Identificador 14990000) instalada na bacia do Rio Amazonas, na da cidade de Manaus. Essa estação é de responsabilidade da

Agência Nacional de Águas (ANA) e operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

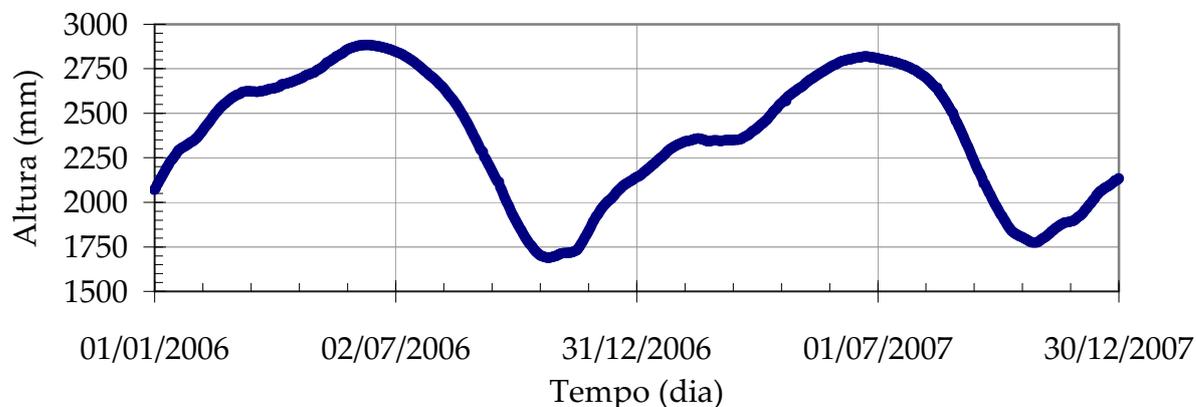


Figura 26 – Medidas realizadas pelo limnígrafo na região de Manaus (Estação MANAUS)

Contudo, apesar de parte dos efeitos sazonais poderem ser devidos ao efeito causado pela carga provocada pelas enchentes, ainda permanecem, na série temporal, outros efeitos que requerem um estudo mais detalhado a fim de identificar a causa desses harmônicos residuais.

5.1.2 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Norte

Procedimentos semelhantes aos aplicados na seção 5.1.1 foram utilizados para remover a tendência e sazonalidade presentes na série referente à componente Norte. Nessa série apresentada na Figura 27, nota-se que a tendência é praticamente o efeito dominante sobre o sinal. Essa característica está relacionada ao efeito do movimento da placa litosférica sul-americana que apresenta a maior velocidade no sentido norte-sul.

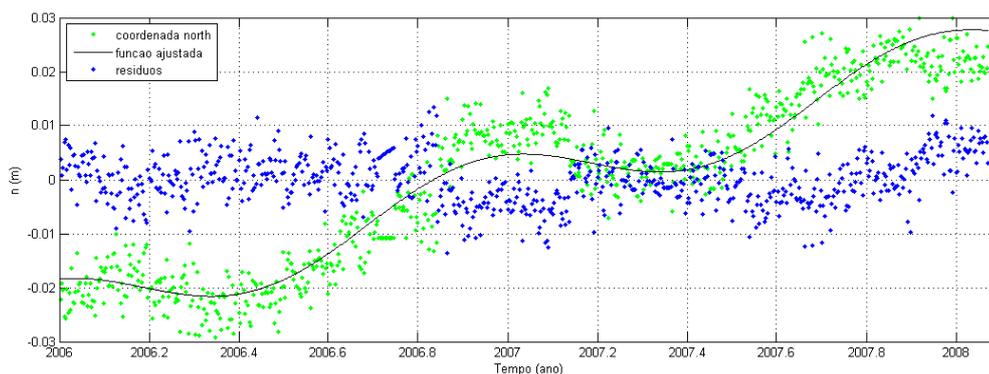


Figura 27 - Componente Norte e curva ajustada

A Figura 27 também apresenta os resíduos após a remoção do efeito sazonal de período anual e semi-anual como também da tendência. A análise por *wavelets* foi realizada e o espectro relacionado é apresentado na Figura 28.

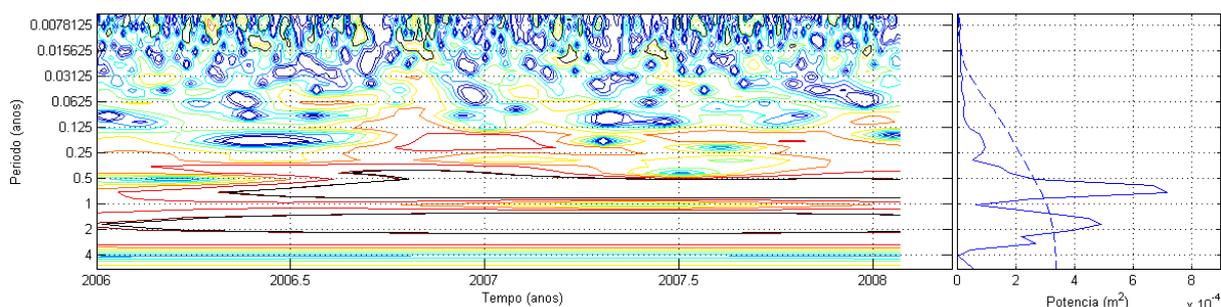


Figura 28 – Espectro de *wavelets* para a série da componente Norte corrigida dos efeitos anual e semi-anual

Com a remoção dos efeitos citados, nota-se que surgem dois picos sendo um deles próximo a 2 anos e outro com período inferior a 1 ano, porém maior que meio ano. Essas frequências são devido a períodos presentes no sinal com magnitude muito pequenas, como pode ser notada pela suas potências, que aparecem assim que os efeitos de grande intensidade são removidos. O mesmo fato também pode ser notado na Figura 25, sendo a mesma hipótese, relacionada ao procedimento de remoção dos efeitos anuais e semi-anuais, estar removendo parcialmente esses efeitos, gerando harmônicos residuais.

5.1.3 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Leste

Na série referente à componente Leste, apresentada na Figura 29, os efeitos anual e semi-anual foram removidos, apesar de essa série apresentar um comportamento aparentemente estacionário, como pode ser notado pela série original na mesma figura.

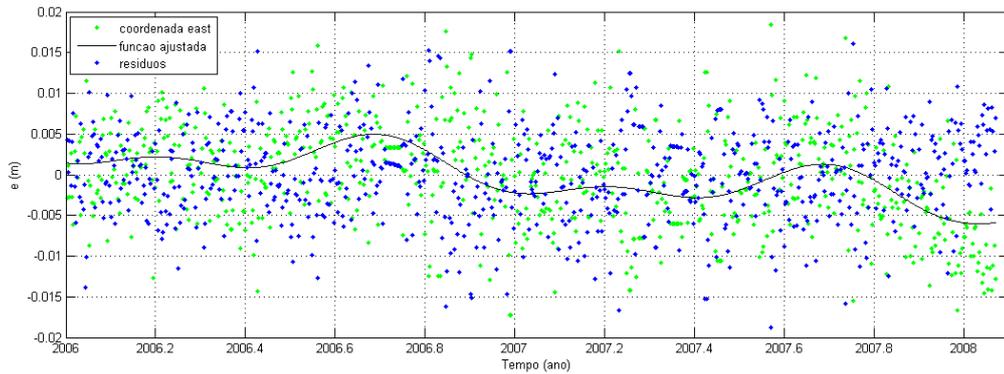


Figura 29 – Componente Leste e curva ajustada. Efeitos anuais e semi-anuais removidos

Na Figura 29 é apresentado o espectro de *wavelets* da série original, onde a presença de efeitos sazonais, revelada pelos vários picos de frequências, é evidenciada por uma anual e outra semi-anual, sendo essa última de energia relativamente menor que o efeito anual.

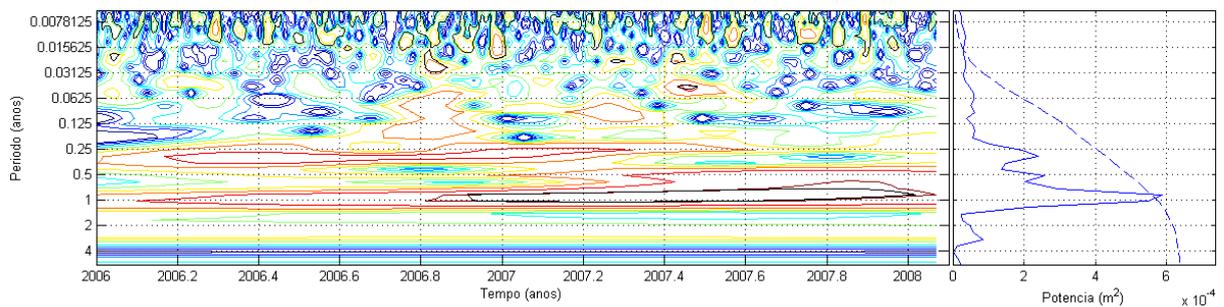


Figura 30 – Espectro de *wavelets* para a componente Leste

Após a remoção dos efeitos, o espectro da Figura 31 revela que a componente Leste também possui efeitos residuais mesmo após os efeitos de maior intensidade ter sido removido.

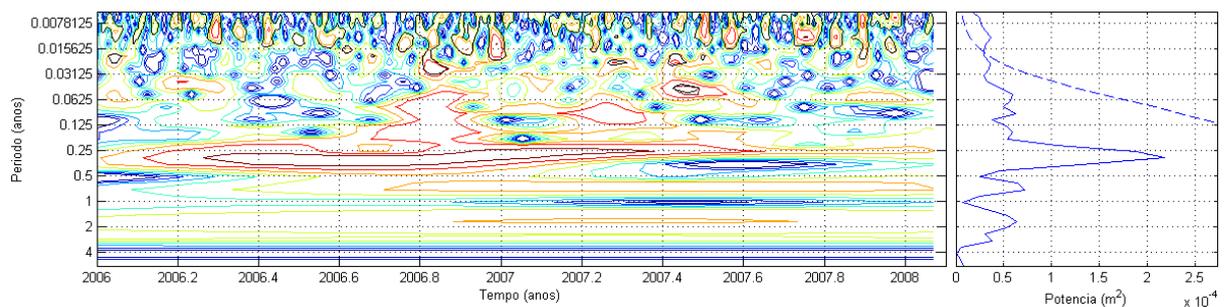


Figura 31 – Espectro de *wavelets* para a componente leste removido os efeitos anual e semianual

Diferente das componentes vertical e norte, a componente leste, depois de removidos os efeitos considerados nos experimentos, nota-se ainda a presença de um pico no espectro, porém em uma frequência diferentes das modeladas. Já era de se esperar uma redução acentuada dos períodos anual e semi-anual em todas as três componentes, mostrando que a metodologia empregada apresenta resultados muito bons relacionado à detecção e remoção dos efeitos sazonais.

5.2 Estação Brasília (BRAZ)

Outro experimento foi realizado utilizando dados de uma estação localizada na região centro-oeste brasileira. Acredita-se que a influência de fatores iguais aos apresentados no item 5.1 seja desprezível. Na Tabela 10 são apresentados alguns detalhes técnicos dessa estação.

Tabela 10 – Informações gerais da estação BRAZ

Estação: BRAZ (Brasília – DF)
Período dos dados: 137 de 1999 a 072 de 2007 / a 241 de 2008.
Receptor: Trimble 4000SSI / Trimble NetRS
Antena: TRM29659.00 NONE / TRM41249.00 NONE

No que se refere aos equipamentos instalados nessa estação, houve troca de receptor e antena visando a modernização da RBMC, fato que deve ser levado em consideração nas análises, pois devem inserir saltos na série temporal. É de se esperar que não ocorram variações na componente vertical, pois a altura da antena permaneceu a mesma e modelos de correção absoluta para variação do centro de fase das antenas foram considerados em todos os experimentos, como descrito na metodologia.

Na Figura 32, Figura 33 e Figura 34 são apresentadas as séries temporais obtidas para a estação BRAZ.

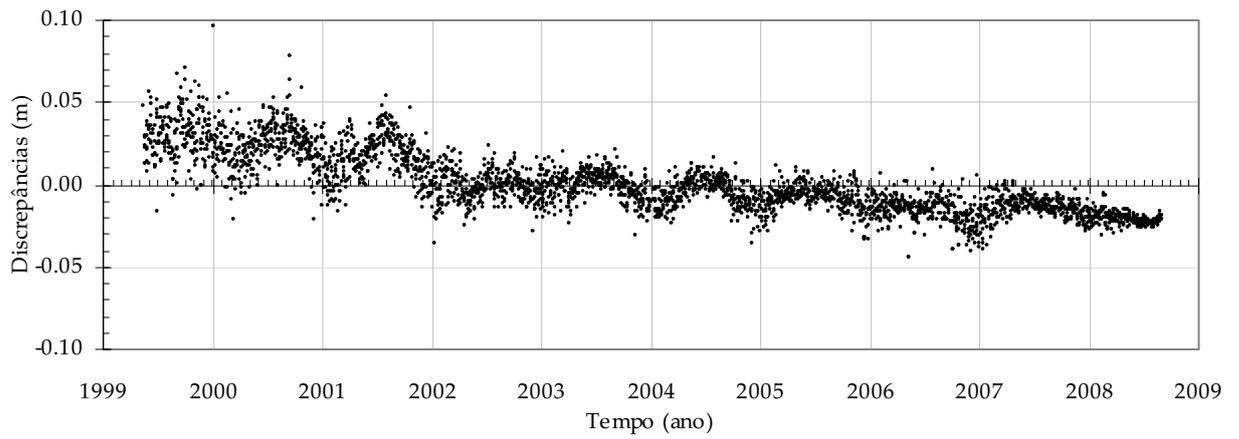


Figura 32 – Componente Leste

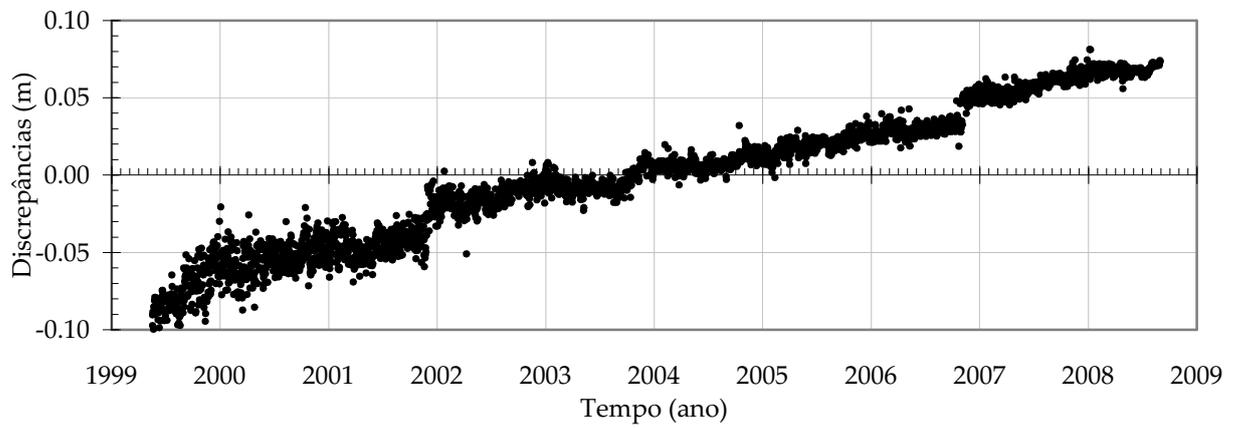


Figura 33 – Componente Norte

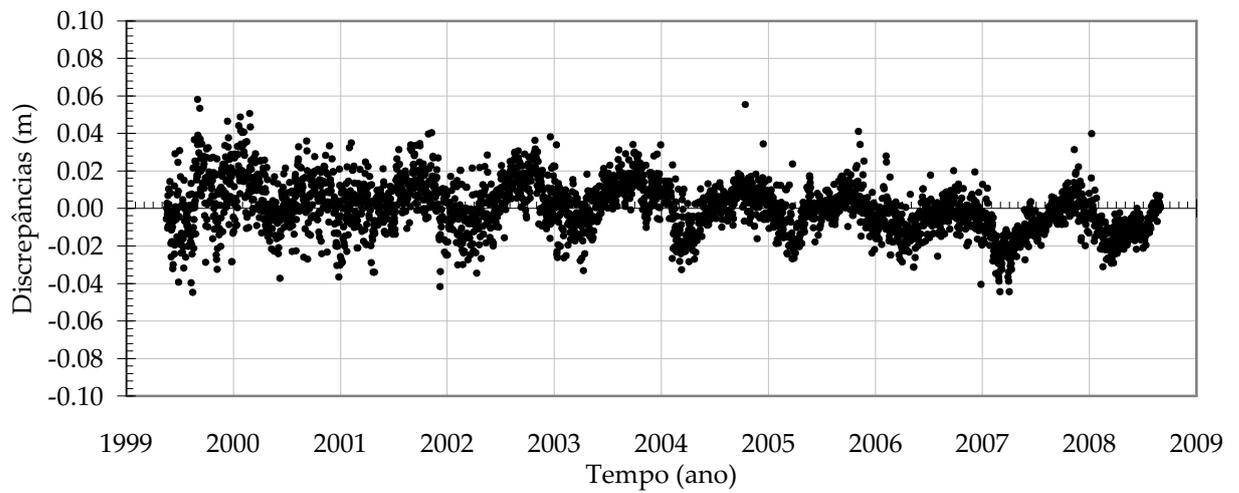


Figura 34 – Componente Vertical

As séries temporais referentes à estação BRAZ apresentaram uma particularidade com relação às apresentadas na seção 5.1. Nota-se que os efeitos sazonais afetam intensamente a componente vertical, como também a componente Leste e Norte.

5.2.1 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Vertical

Com relação à série temporal para BRAZ, componente Vertical, a metodologia proposta foi aplicada seguindo os mesmos procedimentos adotados na seção 5.1.1. O espectro de *wavelets* para a série temporal original é apresentado na Figura 35.

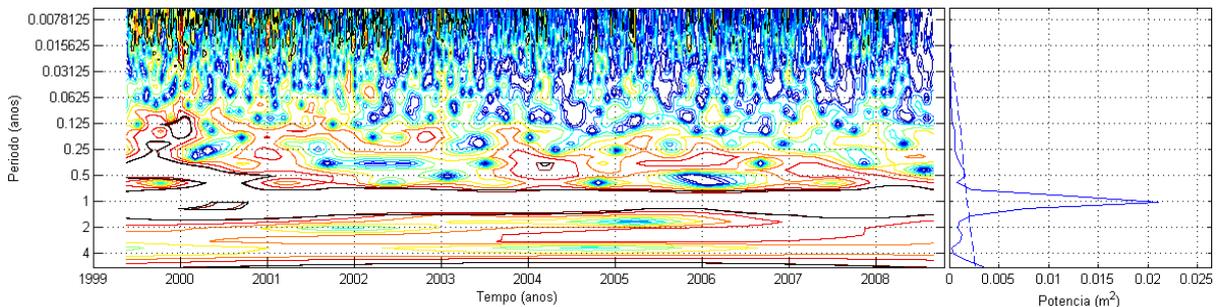


Figura 35 – Espectro de *wavelets* para a componente Vertical.

O gráfico de potências apresenta um pico acentuado para o período de um ano. Esse efeito é removido aplicando-se o ajuste pelo MMQ. O resultado é apresentado na Figura 36.

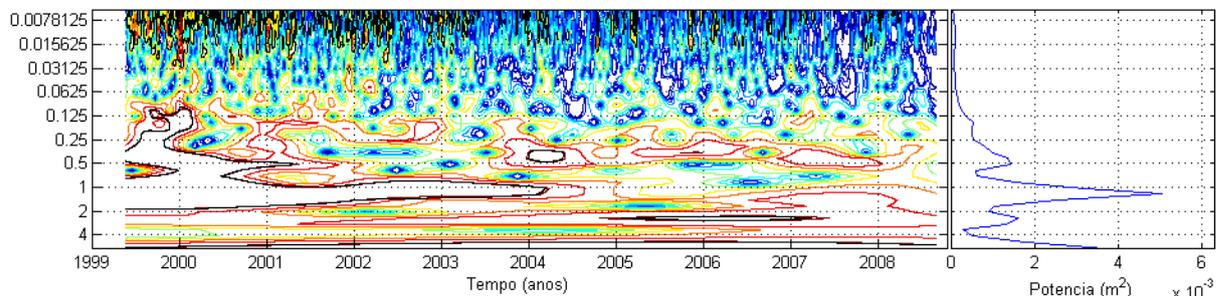


Figura 36 – Componente Vertical com efeito anual removido

Realizando uma comparação do espectro de potência da Figura 35 e Figura 36, percebe-se que o efeito anual foi removido, contudo, um efeito sazonal de potência

relativamente maior que o semi-anual foi revelado. Acredita-se que esse pico de maior intensidade, com período correspondente a 444,75 dias, seja causado devido à porção muito ruidosa na série temporal durante os anos de 1999 a 2003. Nesse período o ciclo de número 23, referente à atividade solar, atingia altos índices de manchas solares, como pode ser constatado na Figura 37, causando o ruído apresentado no espectro de *wavelets* apresentado na Figura 36.

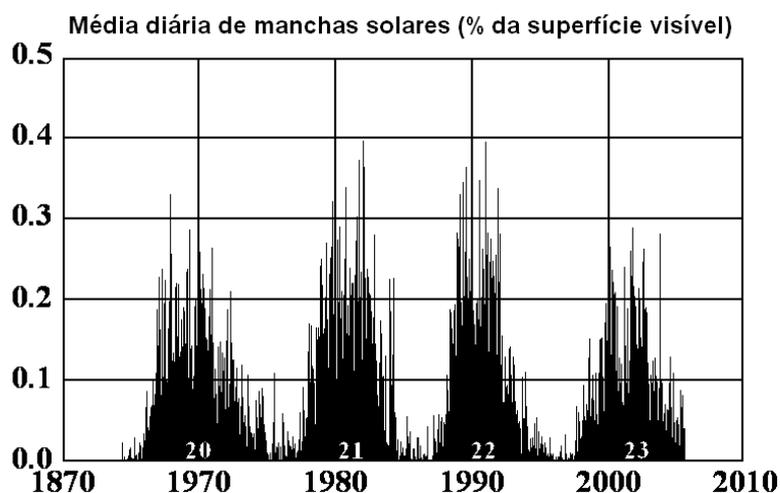


Figura 37 - Manchas solares

(Adaptado de <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/bfly.gif>)

5.2.2 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Norte

Na componente Norte são notados dois saltos (próximos de 2002 e 2007 na Figura 33), os quais foram removidos mediante uma subtração do valor médio obtido para cada parte da série temporal, dividida em três séries menores. Caso a série fosse analisada com esses saltos, parte da informação relacionada aos efeitos sazonais seria oculta devido ao grande nível de energia que esses saltos necessitam para serem representados espectralmente. Na Figura 38 é apresentado o espectro de *wavelets* para a componente Norte.

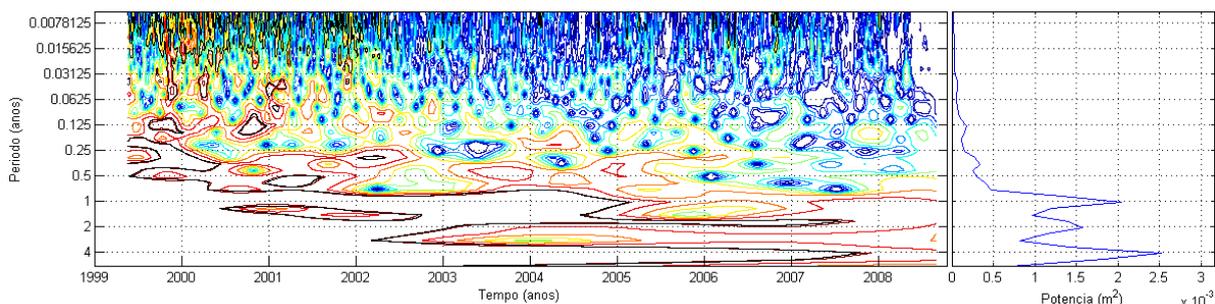


Figura 38 – Espectro de *wavelets* e potência para a componente Norte

Na Figura 38 o espectro de potências revela mais dois picos, além do pico referente à componente anual. Uma particularidade desses três períodos detectados é que os mesmos são múltiplos. Contudo, na metodologia, apenas os efeitos anuais e semi-anuais têm sido considerados no processo de filtragem e apenas o período anual dessa série será removido. O espectro resultante é apresentado na Figura 39.

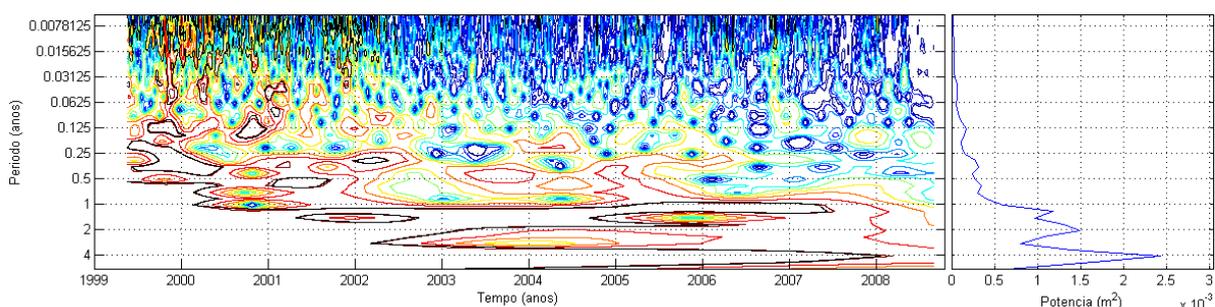


Figura 39 – Espectro de *wavelets* e potência para a componente Norte com o efeito anual removido

Considerando a distribuição dos resultados obtidos entre os anos 1999 a 2008, outros efeitos de longo período puderam ser detectados, sobre os quais ainda não foram formuladas hipóteses que permitam relacioná-los com algum fator ambiental, por exemplo.

5.2.3 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Leste

A componente Leste apresentou efeitos semelhantes àqueles apresentados referentes à componente Norte. Contudo, o efeito anual mostrou-se predominante sobre os demais efeitos que foram detectados no espectro de *wavelets* e potências apresentadas na Figura 40.

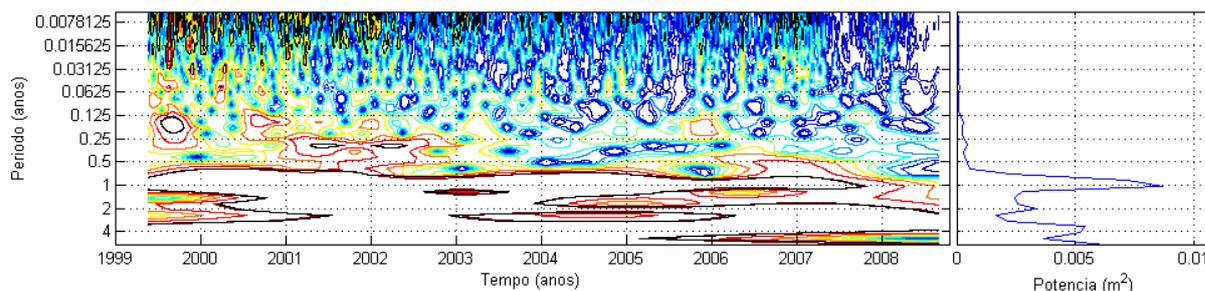


Figura 40 – Espectro de *wavelets* e potência para a componente Leste

Na série temporal referente à componente Leste, apenas o efeito anual foi detectado, sendo removido. O espectro de *wavelets* após a remoção desse efeito é apresentado na Figura 41.

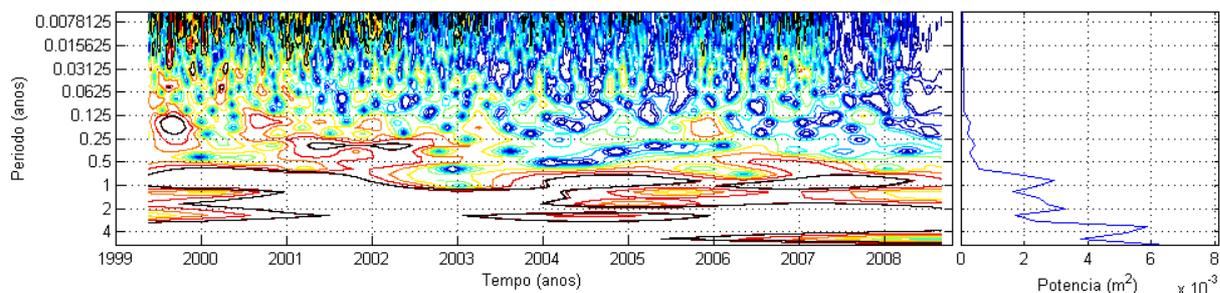


Figura 41 – Espectro de *wavelets* e potência para a componente após a remoção do efeito anual

Após a remoção do efeito anual, nota-se que os efeitos periódicos remanescentes ocorrem quase que semelhantemente àqueles apresentados na análise para a série temporal Norte (Figura 39), sendo as mesmas considerações válidas para essa componente.

5.3 Estação Fortaleza (BRFT)

O último experimento realizado utilizou os dados coletados pela estação BRFT, cujos detalhes técnicos são apresentados na Tabela 11. Uma diferença técnica dessa estação para as outras duas apresentadas é que a mesma possui em operação um receptor GPS de fabricante diferente. Outras diferenças serão apontadas nessa seção.

Tabela 11 – Informações técnicas relacionadas à estação BRFT

Estação: BRFT (Euzébio - Ceará)
Período dos dados: 001 de 2006 a 200 de 2008
Receptor: Leica GRX1200GGPRO
Antena: LEIAT504 NONE

Outra particularidade dessa estação é que a mesma é provida de padrão de tempo atômico externo para o receptor. Espera-se que resultados pouco ruidosos sejam obtidos no que se refere ao erro do relógio do receptor, sendo possível detectar com mais clareza outros efeitos na série temporal dessa estação.

Na Figura 42, Figura 43 e Figura 44 são apresentadas as séries temporais referentes às coordenadas locais Vertical, Norte e Leste, obtidas para a estação BRFT.

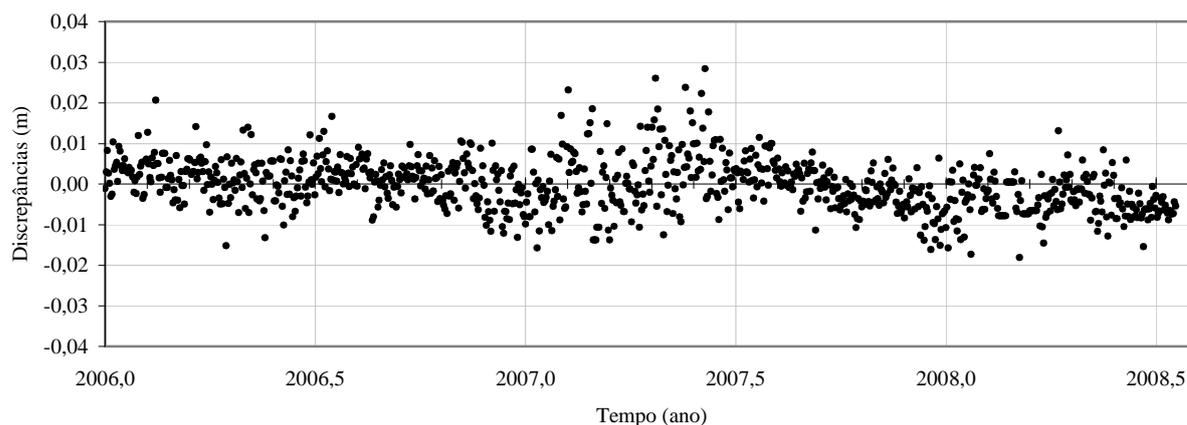


Figura 42 – Componente Leste

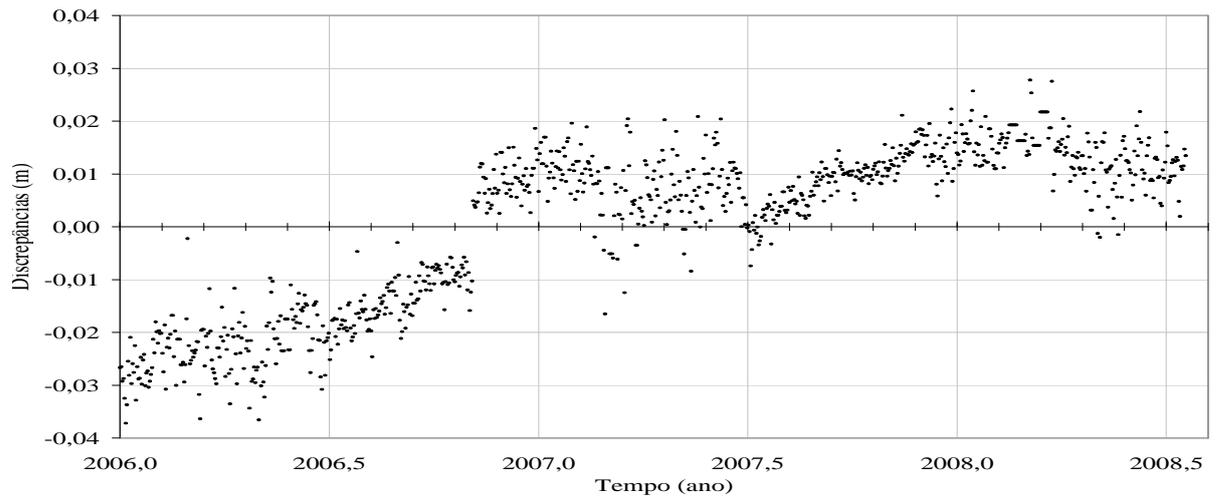


Figura 43 – Componente Norte

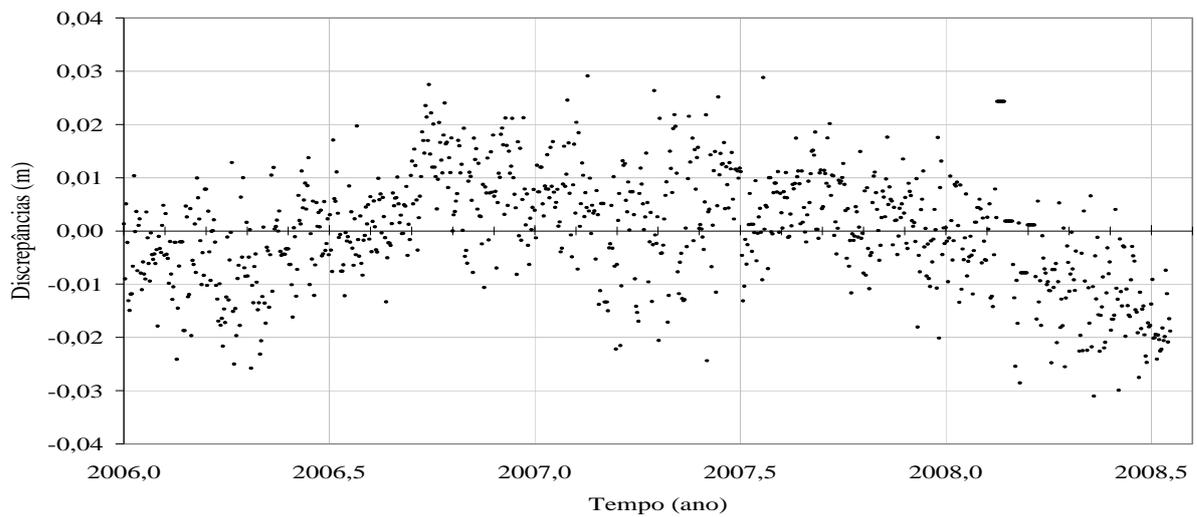


Figura 44 – Componente Vertical

Essas séries, de aproximadamente dois anos e meio são praticamente todo o histórico de dados da estação BRFT. Os efeitos anual e semi-anual poderão ser estimados, apesar de o período do efeito anual estar próximo ao limiar estabelecido pelo critério de Nyquist (seção 3.1).

5.3.1 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Vertical

Assim como nos experimentos anteriores, o espectro de *wavelets* para cada etapa de remoção foi apresentado, revelando algumas características bem particulares para cada estação. Na Figura 45 é apresentado o espectro de *wavelets* para a componente Vertical.

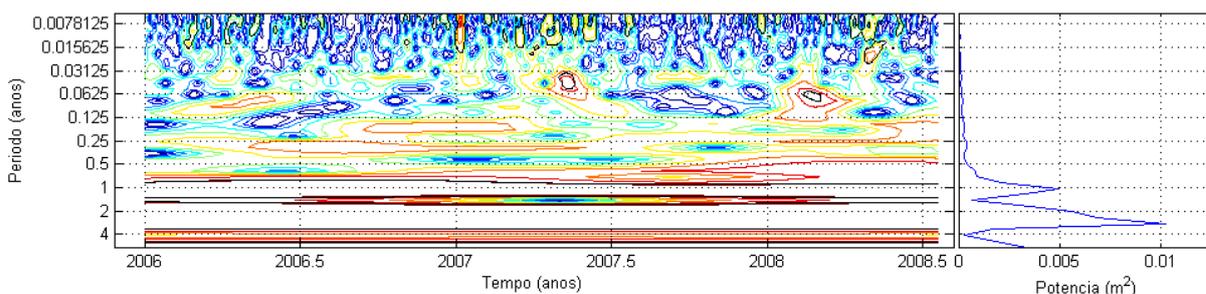


Figura 45 – Espectro de *wavelets* para a componente vertical

Na Figura 45, os picos apresentados no espectro de potências são semelhantes aos apresentados nos experimentos anteriores. Contudo, nota-se a presença de um pico mais acentuado, comparado ao referente do efeito anual. A presença do efeito semi-anual não pode ser ainda detectada, mesmo com a remoção do efeito anual, resultado apresentado na Figura 46.

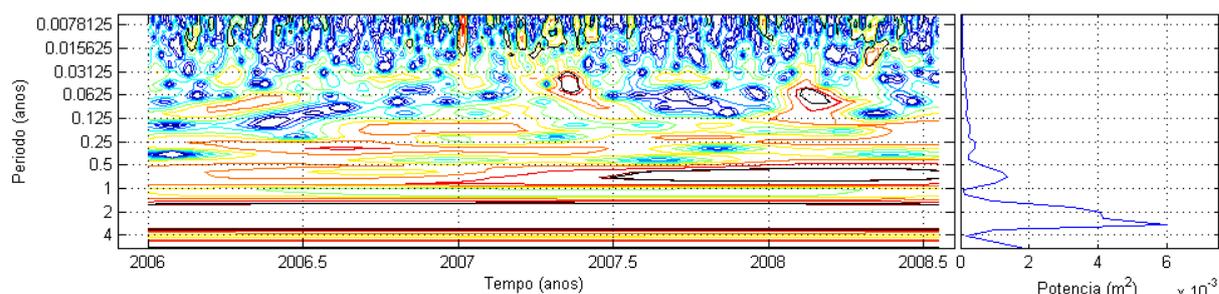


Figura 46 – Espectro de *wavelets* e potência para a componente Vertical com o efeito anual removido

Mesmo com a remoção do efeito anual, a presença de um pico, com energia relativamente alta, faz com que outros efeitos não sejam realçados no espectro de potências. Apesar disso, o efeito semi-anual não pôde ser notado nesses resultados.

5.3.1.1 Remoção dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera da componente Vertical

A fim de investigar a influência dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera foi realizada a correção dos dados da estação BRFT. Essa correção foi realizada com o *software* RINEX_HO (MARQUES, 2008) que corrige o efeito diretamente nos arquivos de observação, reescrevendo-os. Os dados corrigidos foram processados, obtendo-se novos resultados que foram transformados para componentes no sistema local (Leste, Norte e Vertical). A partir da diferença entre as séries temporais para a componente Vertical corrigida e não corrigidas foi realizada a análise por *wavelets*. Optou-se por realizar essa análise sobre as diferenças calculadas, pois nos gráficos o efeito da correção foi praticamente imperceptível. A

Figura 47 apresenta as diferenças calculadas entre a série Vertical não corrigida e a corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera.

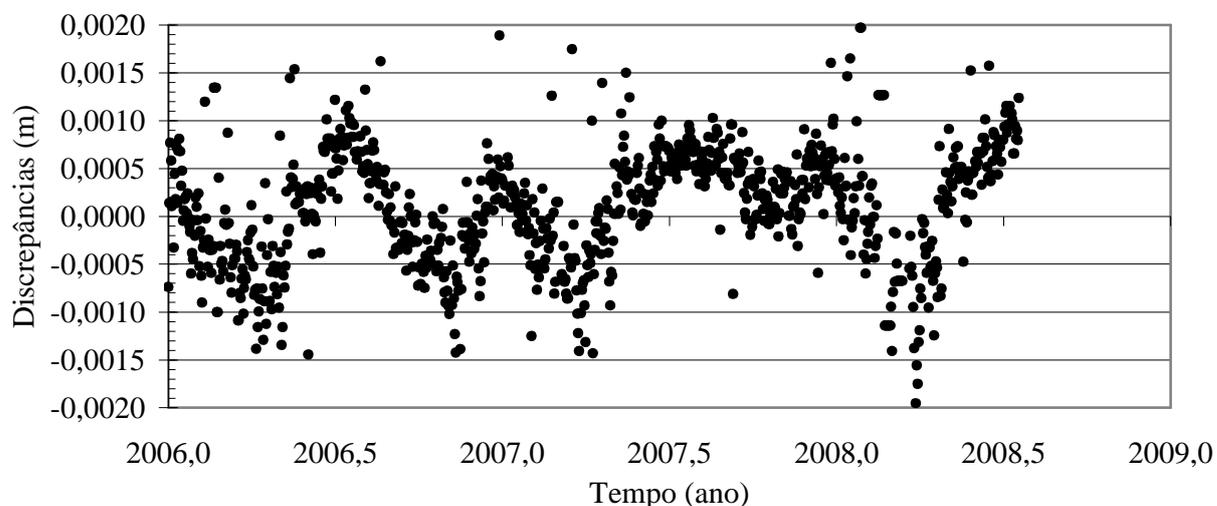


Figura 47 – Série temporal resultante da diferença entre a série Vertical obtida a partir dos dados não corrigidos e corrigidos dos efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera

Na

Figura 47 é apresentado o espectro de *wavelets* para a série de diferenças apresentada. O efeito residual apresentado no espectro, além do pico mais relevante, indica um efeito com período semi-anual. Nota-se que um segundo efeito periódico de aproximadamente 2 anos, de menor potência é realçado no espectro.

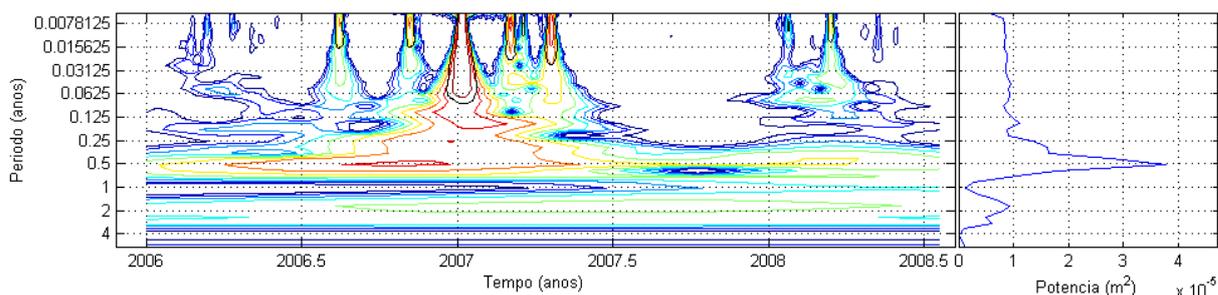


Figura 48 – Espectro de *wavelets* para a diferença entre as séries temporais da componente Vertical corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera

5.3.2 Remoção dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera da componente Norte

A análise por *wavelets* para a série temporal referente à diferença entre a série corrigida e não corrigida, da componente Norte, dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera também foi realizada. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 49.

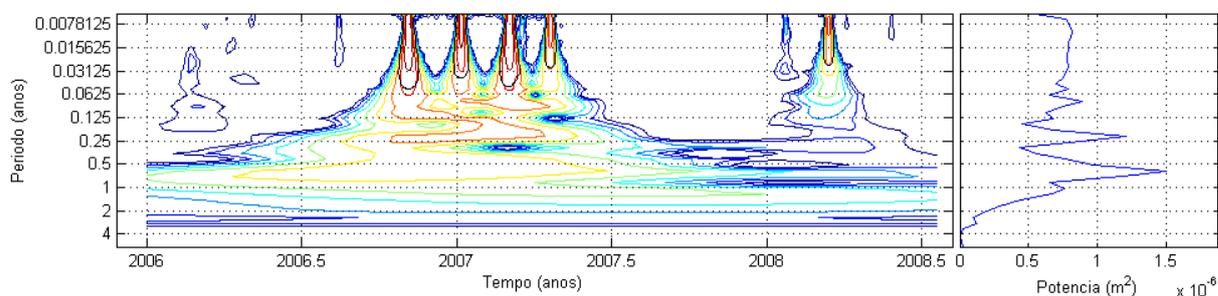


Figura 49 - Espectro de *wavelets* para a diferença entre as séries temporais da componente Norte corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera

A influência da remoção dos efeitos da ionosfera (2ª e 3ª ordem) apresentou alguns picos no espectro de potências, porém uma análise mais detalhada é necessária para verificar as prováveis causas desses períodos detectados.

5.3.3 Remoção dos efeitos de tendência e sazonais para a componente Leste

A última componente a ser analisada foi a Leste, que apresentou um conjunto de frequências próximas ao período de um ano, diferente para efeito semi-anual, o

qual não pôde ser detectado no espectro de potências, apresentado na Figura 50, juntamente com o espectro de *wavelets*.

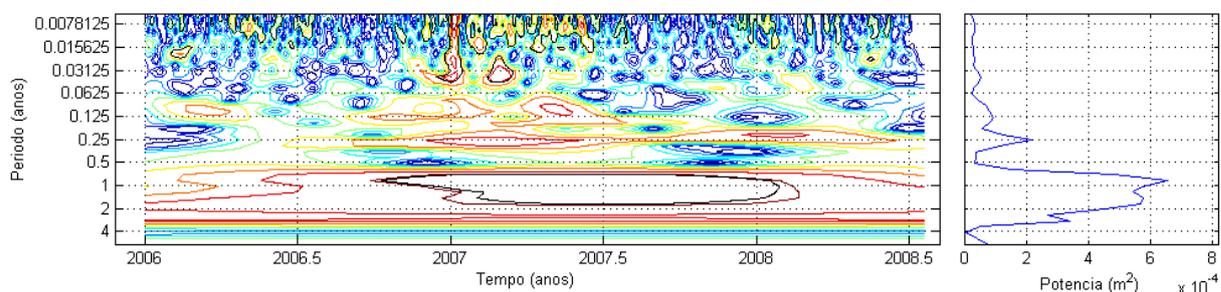


Figura 50 – Espectro de *wavelets* e potência para a componente Leste

Após a remoção do efeito anual, pôde-se notar que ainda quatro novos efeitos periódicos permaneceram na série. Os resultados após a filtragem do efeito anual são apresentados na Figura 51.

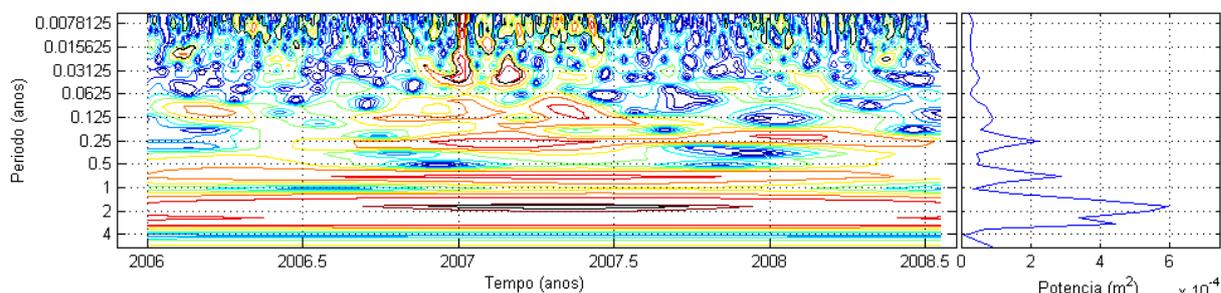


Figura 51 - Espectro de *wavelets* e potência para a componente Leste após a remoção do efeito anual

Apesar da série referente à componente Leste apresentar mais picos referentes a efeitos periódicos presentes no sinal, verifica-se que a potência desses efeitos remanescentes é relativamente menor que daqueles apresentados na Figura 46, indicando que os efeitos sazonais afetam principalmente a componente Vertical.

5.3.3.1 Remoção dos efeitos de segunda e terceira ordem relacionados à ionosfera da componente Leste

Para verificar a influência dos efeitos de 2ª e 3ª ordem relacionados à ionosfera sobre a componente Leste, a análise por *wavelets* também foi realizada. Também foram usadas as diferenças calculadas entre a série Leste advinda do processamento com

dados corrigidos e aquela obtida a partir dos dados não corrigidos do efeito. Na Figura 52 é apresentado o espectro de *wavelets* e potência para a componente Leste corrigida do efeito anual e ionosfera (efeitos de 2^a e 3^a ordem).

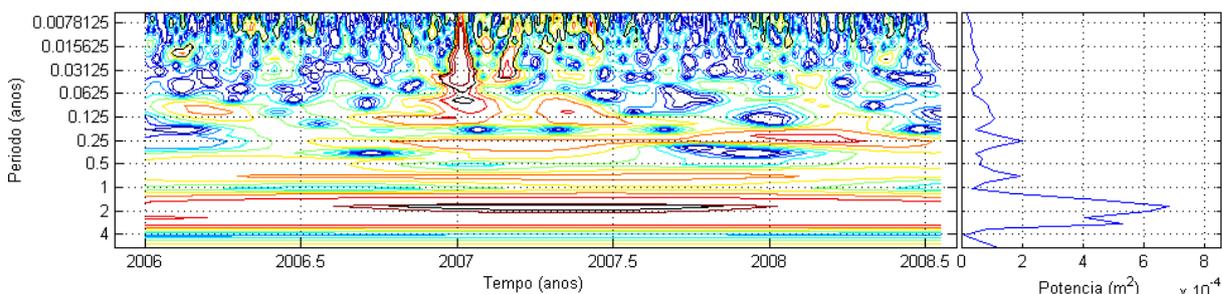


Figura 52 - Espectro de *wavelets* e potência para a componente Leste

Comparando a Figura 52 com a Figura 51 (seção 5.3.3) pode-se notar uma ligeira diferença no que diz respeito aos picos com períodos menores que um ano, pois esses apresentam-se com uma atenuação após a remoção do efeitos considerado neste experimento. Porém, o mesmo não ocorreu com os efeitos de período maiores que um ano, os quais apresentaram-se um pouco mais acentuados. Na Figura 53 é apresentado o espectro de *wavelets* e potência relacionado ao efeito removido da série com a aplicação das correções relacionadas aos efeitos da ionosfera aqui considerados.

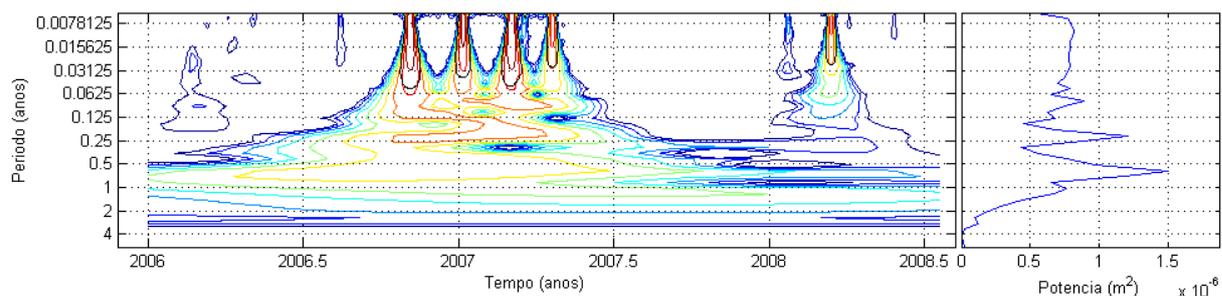


Figura 53 - Espectro de *wavelets* para a diferença entre as séries temporais da componente Leste corrigida e não corrigida dos efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera

5.4 Considerações finais

Dos resultados apresentados, verificou-se a presença de efeitos sazonais de período anual e semi-anual nas séries temporais de coordenadas das estações da RBMC analisadas, da mesma forma como apresentado em Amiri-Simkoei, Tiberius e Teunissen

(2007) e Nikolaidis (2002). Chegou-se também à conclusão que os efeitos de natureza sazonal presentes nas séries temporais de coordenadas afetam principalmente a componente vertical (*up*), fato também apresentado em Beavis, (2005), Amiri-Simkooei, Tiberius, Teunissen (2007) e Amiri-Simkooei (2008).

Atualmente os modelos disponíveis para o Brasil para atualização de coordenadas apenas levam em consideração a velocidade das coordenadas, em suas componentes horizontais. O modelo velinter tem sido disponibilizado pelo IBGE para uso da comunidade científica e técnica. Vê-se, portanto a necessidade do desenvolvimento ou aperfeiçoamento do modelo de velocidades atualmente disponível, de forma que sejam considerados os efeitos sazonais que afetam as estações de referência. Como exemplo, pode-se tomar a situação da estação NAUS, cuja amplitude da variação da curva ajustada chega a mais que 5 cm para a componente vertical, ou seja, um erro de 2,5 cm aproximadamente nessa componente, como mostra a Figura 22.

6 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nessa dissertação foi apresentada uma proposta metodológica para modelagem das séries temporais de coordenadas estimadas com GNSS, em especial GPS. A série temporal foi gerada a partir do método de posicionamento denominado PPP. Foram utilizadas duas técnicas integradas: *wavelets* e estimativa pelo MMQ. Enquanto a primeira proporciona a frequência ou período com que determinado fenômeno ocorre, bem como sua localização no tempo, a segunda permite estimar os parâmetros que descrevem a série temporal no que diz respeito à amplitude do efeito, possibilitando sua remoção com base na frequência injuncionada, obtida pela análise de *wavelets*. A integração dessas duas ferramentas matemáticas parece ser uma ótima solução para investigações desta natureza.

Nesta pesquisa foram realizados experimentos com dados reais, obtidos de algumas estações GPS de monitoramento contínuo instaladas pelo território brasileiro. A amostra de estações pode ser considerada representativa, contudo ainda insuficiente para descrever os fenômenos envolvidos, devido à heterogeneidade de clima, condições geográfica etc. de um país continental como o Brasil. Mas mesmo assim os resultados obtidos dos experimentos auxiliam a inferir que efeitos similares podem ser encontrados nas demais estações da RBMC instaladas pelo país. Os experimentos em trabalhos futuros deverão, portanto ser conduzidos com maior atenção às particularidades de cada região.

Com os resultados obtidos a partir da integração das técnicas de *wavelets* e MMQ foi possível verificar a presença de efeitos sazonais de período anual e semi-anual nas séries temporais de coordenadas das estações da RBMC analisadas. Além disso, constatou-se que o maior efeito sazonal está praticamente concentrado na componente Vertical. O efeito desses erros afeta as coordenadas das estações de referência (base) a ser utilizada num posicionamento relativo, e conseqüentemente, as coordenadas determinadas a partir dessa estação. Nesse método considera-se que os erros comuns são praticamente eliminados quando efetuadas as duplas diferenças entre as observações e estações envolvidas no processamento, desde que as linhas de base sejam relativamente curtas. Mas efeito de natureza sazonal em sua maioria não são cancelados.

As situações que envolvam o PPP apresentam resultados totalmente eivados dos efeitos sazonais. O não tratamento adequado de sua sazonalidade pode-se levar a conclusões incongruentes. O PPP tem sido utilizado em experimentos relacionados à geodinâmica, mas atualmente vem ganhando espaço em outras aplicações que requeiram

posicionamento. Hoje se obtém resultados com o PPP muito próximos aos obtidos pelo método relativo, contudo com um intervalo de dados maior que o utilizado no posicionamento relativo. Se tais efeitos não forem corrigidos baseados num modelo robusto, as vantagens de um método dessa natureza são perdidas.

Cabe acrescentar ainda mais algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Investigar mais profundamente as prováveis causas dos efeitos periódicos anual e semi-anual, bastante evidentes nas séries de coordenadas, principalmente na componente vertical. Além disso, é importante investigar a causa dos efeitos detectados além dos relacionados às componentes anual e semi-anual. Verificou-se, por exemplo, para as séries temporais Norte e Leste da estação BRAZ, a presença de efeitos bem nítidos com periodicidade de 2 e 4 anos, os quais merecem investigações;
- Melhorar o processo de integração de *wavelets* e MMQ, de forma a se tornar mais eficiente em termos operacionais, tornando mais acessível essa facilidade aos usuários por meio de interfaces gráficas desenvolvidas no software Matlab;
- Investigar a possibilidade dos efeitos periódicos residuais restantes nas séries temporais serem devidos a *aliasing*;
- Dar continuidade as pesquisas iniciadas aplicando a metodologia também nas demais estações da RBMC para que o campo de velocidades e o campo de efeitos para o Brasil possam ser melhorados.

Finalmente, vale ressaltar que nos processamentos descritos utilizou-se como função mapeamento de Niell. Hoje é recomendada a utilização da função Viena de mapeamento. Desta forma, recomenda-se que outros experimentos sejam realizados visando avaliar se de fato há melhorias ao utilizar essa função nas condições do Brasil.

REFERÊNCIAS

AKROUR, B., SANTERRE, R., GEIGER, A. Calibrating Antenna Phase Centers: A tale of two methods. *GPS World*. Fev 2005.

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

AMIRI-SIMKOOEI, A.R., TIBERIUS, C.C.J.M, TEUNISSEN, P.J.G. Asssesmet of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results. In *Journal of Geophysical Research*, v. 112. 2007. 19p.

BEAVIS, 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.

BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, v. 17, n.3, p. 199-202, mar 1990

BLEWITT, G. Data processing methodology: From theory to applications, In: TEUNISSEN, P. J. G; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2.ed. Berlin: Springer, 1998. p.231-270.

BRACEWELL, R. Heaviside's Unit Step Function. In *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 61-65, 2000.

BOX, George E.P. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994. 598p.

CHATFIELD, C. *The analysis of time series: an introduction*. 3.ed. New York: Chapman and Hall, 1984. 286p.

CHEN, X. LANGLEY, R.B. DRAGERT, H. *Investigation of Annual Variations in the WCDA GPS Solutions*. ION, 1996.

CHRISTOPOULOU, E. B., SKONDRAS, A. N., GEORGAKILAS, A. A. Time series analysis of sunspot oscillations using the wavelet transform. *IEEE*, 2002. 4p.

CAMARGO, P.O. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência*. 1999. 191p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DAL POZ, W. R. *Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas*. 2005. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DING, X.L. et al. Seasonal and secular positional variations at eight co-located GPS and VLBI stations, v.79, *Journal of Geodesy*, p71-81, 2005.

FRANCISCO, S. G. *GPS Operational Control Segment*. In: PARKINSON, Bradford W.; SPILKER, J. J. *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. Cap. 10, p. 435-466. (Progress in Astronautics and Aeronautics).

FRENCH, G. T. *Understanding the GPS: An Introduction to the Global Positioning System*. United States: Georesearch, 1996. 255 p.

FREYMUELLER, J. T. *An automatic data editing program for dual-frequency codeless GPS receivers*. In: PhaseEdit 1.1 User's Guide. 1991. 14 p.

GEMAEL, C. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319p.

GÖRRES, B., CAMPBELL, J., BECKER, M., SIEMES, M. Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. *GPS Solutions*, v. 10, p136-145, jan. 2006.

GPSWorld. *Leica Unveils Quad Constellation Choke Ring Antenna*. 2008. Disponível em: <http://cp.gpsworld.com/gpsc/Mass+Market+OEM+News/Leica-Unveils-Quad-Constellation-Choke-Ring-Antenn/ArticleStandard/Article/detail/502573?contextCategoryId=39059&searchString=choke%20ring%20leica>. Acesso em: 01 set. 2008.

GREGORIUS, T. *GIPSY-OASIS II: How it works...* Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996

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

IBGE. Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. BRASIL: 2008. Apresenta informações a respeito das estações da rede de estações GPS de monitoramento contínuo do IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>> Acesso em: 12 mai. 2008.

IBGE. Mapas interativos: Climas. BRASIL, 2008. Aplicativo para recuperação de mapas. Disponível em <http://mapas.ibge.gov.br/clima/viewer.htm>>. Acesso em 22 set 2008a.

IERS. International Earth Rotation and Reference Systems Service. Earth orientation data. Disponível em: <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=36-9>>. Acesso em 25 jun. 2007.

IERS. International Earth Rotation and Reference Systems Service. Polar Motion. Disponível em: <http://www.iers.org/MainDisp.csl?pid=95-88>>. Acesso em 19 ago. 2008.

IGS. International GNSS Service: IGS-Equipment-Files update announcement mailing list. 2008. Disponível em: <http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igs-equipment-files/igs-equipment-files.html>>. Acesso em 01 set. 2008a.

IGS. International GNSS Service: IGS Products. 2008. Disponível em: <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em 12 mai. 2008.

IGS. International GNSS Service: IGS Stations. 2008. Disponível em: <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/list.html>>. Acesso em 27 mai. 2008.

IGSMail. New IGS Clock Combination. n. 3087. 2000. Disponível em: <http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2000/msg00426.html>>. Acesso em 14 mai. 2008.

INGLE, V. K. *Digital Signal Processing using MATLAB*. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000. 418 p.

ITRF2005 : Datum Definition. 2007. Apresenta informações a respeito da definição do ITRF2005. Disponível em: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/datum_ITRF2005.php>. Acesso em: mar. 2007.

JEFFERSON, D. C., HEFLIN, M. B. MUELLERSCHOEN, R. J. Examining the C1-P1 pseudorange bias. *GPS Solutions*. v. 4, n. 4, p. 25-30, 2001.

KAPLAN, E. D. (Ed.). *Understanding GPS: Principles and Applications*. Boston: Artech House, 1996. 554 p. (Mobile Communications).

KOUBA, J., HEROUX, P. GPS Precise Point Positioning using IGS orbit products. Geodetic Survey division, 2000. 18p. Disponível em <
<http://www.geod.nrcan.gc.ca/publications/papers/pdf/final.pdf>>

KOUBA, J. *A guide to using International GPS Service (IGS) products*. Ottawa: Geodetic Survey Division, 2003. 31 p. Disponível em:
<<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>>

KUNYSZ, W. High performance pinwheel antenna. 2001. Novatel Inc. Disponível em: <
http://www.novatel.com/Documents/Papers/gps_pinwheel_ant.pdf>. Acesso em: 01 set. 2008

LANGLEY, R. B. Why is the GPS signal so Complex?. *GPS World*. Mai 1990.

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

MADER, G. A comparison of absolute and relative GPS Antenna Calibrations. 2001. *GPS solutions*. v. 4, n. 4, p37-40, 2001

MADER, G. *GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey*. 2005. Disponível em <
<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/images/summary.pdf>>. Acesso em 07 dec. 2006.

MAREL, H. Active GPS control stations: Theory, implementation and application. In: Teunissen, P.J.G. *GPS for Geodesy*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. p. 389-435.

MARQUES, H.A. *Influência da ionosfera no posicionamento GPS: Estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem*. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 29 jan 2008.

MATSUOKA, M. T. *Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira*. 2007. 263 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 28 fev 2007.

McCARTHY, D.D.; PETIT, G. *IERS Conventions (2003)*. IERS Technical Note 32, IERS Convention Center, Frankfurt. 2004. 127p.

MONICO, J.F.G., STEWART, M. Modelos Matemáticos envolvidos na Integração GPS/GLONASS. In: *Congresso Brasileiro de Cartografia*, XIX, 1999.

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

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

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

MONICO, J F G . As Condições NNT e NNR na realização de um referencial. In: *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 45-52, 2005b. Disponível em < <http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/1544/1294>>. Acessado em: 14 Set 2008.

MONICO, J F G . Fundamentos matemáticos envolvidos na realização do ITRS. In: *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 337-351, 2006 < <http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/7243/5185> >. Acessado em: 14 Set 2008.

MONICO, J.F.G. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. 2.ed. São Paulo: Unesp, 2007. 471p.

MORETTIN, P.A. *Ondas e ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999. 272p.

MORETTIN, P.A., TOLOI, C.M.C. *Análise de séries temporais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. 535p.

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

NIKOLAIDIS, R. *Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System*. Tese de doutorado. University of California, 2002. 249p.

OLIVEIRA, H. M. *Análise de sinais para engenheiros: uma abordagem via Wavelets*. Rio de Janeiro: Brasport, 2007. 244p.

PARKINSON, B. W.; SPILKER, J. J. *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. 793 p. (Progress in Astronautics and Aeronautics).

RICHERT, T. *The Impact of Future Global Navigation Satellite Systems on Precise Carrier Phase Positioning*. 2005. 213 f. Mestrado (Mestrado em Geomática) – University of Calgary, Calgary.

ROTHACHER, M. Comparison of Absolute and Relative antenna phase center variations. *GPS solutions*, v. 4, n. 4, p. 55-60, 2001.

ROTHACHER, M.; SCHIMD, R. The Antenna Exchange Format version 1.3. 2006. Disponível em <<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/antex13.txt>>. Acesso 23 jan. 2009.

SANTOS, M. C.; FERREIRA, L. D. D.; LAGO, I. F. Integração entre GPS e GLONASS. In: *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 6, n. 2, p.15-24, 2001. Disponível em: <<http://calvados.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/1360/1114>>. Acesso em: 10 jun. 2007.

SANTOS, M. C. *Variações de alta frequência da duração do dia*. Instituto Geográfico Cadastral. v. 11, p 53-60. 1992a. Separata.

SANTOS, M. C. *Spectral analysis and filtering of an artificially generated time series*. Term paper for SE 6122 Approximation and Time Series, dez 1992b. 14 p.

SANTOS, M. C. Integração entre GPS e GLONASS. *Boletim de Ciências Geodésicas*. Curitiba, v. 6, n. 2, p.15-24, 2001.

SAPUCCI, L. F. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SCHMID, R. From relative to absolute antenna phase center corrections. In: *IGS Celebrating a decade of the International GPS Service*, 2004, Berne. *Anais... AIUB*, 2004. p. 209-219.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications*. 2.ed. New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SOUZA, E. M. *Efeito de multicaminho de alta frequência no posicionamento GPS relativo estático: detecção e atenuação utilizando wavelets*. 2004. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

SOUZA, E.M. *Análise Wavelet: detecção e redução do multicaminho no posicionamento relativo GPS estático e cinemático*. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Estado de São Paulo, Presidente Prudente.

TORRENCE, C., COMPO, G.P., *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1998. 18 p. Disponível em <<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets>>. Acesso em: 12 de maio 2008.

USNO, United States Naval Observatory. *GPS Constellation Status*. 2007. Disponível em: <<http://tycho.usno.navy.mil/ftp-gps/gpstd.txt>>. Acesso em: 12 de maio 2008.

WEBB, F. GIPSY-OASIS: Qregres on line help. 1993.

WEISSTEIN, E.W. Heaviside Step Function. In: MathWorld - A Wolfram Web Resource. Disponível em <<http://mathworld.wolfram.com/HeavisideStepFunction.html>> . Acesso em 28/09/2008.

WILSON, B.D et al. New and improved: The broadcast interfrequency biases. In: *GPS World*, 1999. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/2014/18173>>. Acesso em: 04 set 2008.

WÜBBENA, G. Automate absolute field calibration of GPS antennas in real time. *Ion GPS*. 2000. 10 p.

ANEXO A

Coeficientes de marés oceânicas obtidos para a estação PPTE no formato HARPOS.

```

HARPOS Format version of 2002.12.12
#
# Calculated on Ore using olfg/olmpp of H.-G. Scherneck
#
#===== Beginning of comments: =====
#
# This file contains site displacements caused by ocean tide loading.
#
# 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: GOT00.2, long period tides from FES99
#
#===== End of comments: =====
#
# Harmonic   Phase           Frequency           Acceleration
#
H m2         2.169437D+00    1.405189027044D-04    1.240D-23
H s2         6.283185D+00    1.454441043329D-04   -7.350D-40
H n2         6.097067D+00    1.378796996516D-04   -1.860D-23
H k2         3.506941D+00    1.458423171028D-04    2.130D-24
H k1         3.324267D+00    7.292115855138D-05    1.060D-24
H o1         5.128356D+00    6.759774415297D-05    1.130D-23
H p1         2.958919D+00    7.252294578148D-05   -1.060D-24
H q1         2.772800D+00    6.495854110023D-05   -1.970D-23
H mf         4.479096D+00    5.323414398410D-06   -1.030D-23
H mm         5.497148D+00    2.639203052741D-06    3.100D-23
H ssa        3.653480D-01    3.982127698995D-07    2.130D-24
#
#EH
#
#F Complete GOT00.2
#C Computed by OLFG, H.-G. Scherneck, Onsala Space Observatory 2008-Aug-1
#
S PPTE       3687623.9622 -4620818.9679 -2386880.4557 -22.1199 -51.4085 431.0
#
D m2         PPTE          0.00656 -0.00190 -0.00130    0.00534 -0.00093 -0.00059
D s2         PPTE          0.00208 -0.00057 -0.00011    0.00226 -0.00054 -0.00043
D n2         PPTE          0.00143 -0.00038 -0.00035    0.00132 -0.00018 0.00007
D k2         PPTE          0.00061 -0.00019 -0.00003    0.00058 -0.00017 -0.00013
D k1         PPTE         -0.00091 -0.00060 0.00037    -0.00097 -0.00035 -0.00097
D o1         PPTE         -0.00068 -0.00064 -0.00017    -0.00156 0.00034 -0.00100
D p1         PPTE         -0.00030 -0.00021 0.00011    -0.00034 -0.00010 -0.00033
D q1         PPTE         -0.00024 -0.00009 -0.00009    -0.00033 0.00014 -0.00019
D mf         PPTE         -0.00026 0.00008 0.00009    -0.00002 -0.00006 -0.00001
D mm         PPTE         -0.00017 0.00004 0.00004    -0.00001 -0.00001 -0.00001
D ssa        PPTE         -0.00015 0.00000 0.00002    0.00000 0.00000 0.00000
#
HARPOS Format version of 2002.12.12

```

Coeficientes de marés oceânicas obtidos para a estação PPTE no formato HARPOS.

```

$$ Ocean loading displacement
$$
$$ Calculated on froste using olfg/olmpp of H.-G. Scherneck
$$
$$ COLUMN ORDER:  M2  S2  N2  K2  K1  O1  P1  Q1  MF  MM  SSA
$$
$$ ROW ORDER:
$$ 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
$$ Gutenberg-Bullen Greens function is used. In the ocean tide model the
$$ 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
$$                       (PP = Post-Processing)
$$
$$ Ocean tide model: GOT00.2, long period tides from FES99
$$
$$ END HEADER
$$
PPTE
$$ Complete GOT00.2
$$ Computed by OLF, H.-G. Scherneck, Onsala Space Observatory 2008-Sep-
$$ PPTE,                                RADI TANG lon/lat: 308.5915 -22.1199
.00846 .00307 .00194 .00084 .00133 .00170 .00046 .00041 .00026 .00017 .00015
.00212 .00078 .00042 .00025 .00070 .00072 .00023 .00017 .00010 .00004 .00000
.00142 .00044 .00036 .00014 .00104 .00102 .00035 .00021 .00009 .00004 .00002
 39.1  47.3  42.7  43.4 -133.1 -113.5 -131.0 -125.3 -174.9 -176.1 -178.3
 26.1  43.2  25.3  40.9  30.2  -27.8  25.3  -58.9  142.5  160.2  103.0
 24.4  75.5 -11.9  78.1  110.8  80.3  108.1  65.1  175.4  173.4  177.3
$$ END TABLE

```

APÊNDICE A

```

function [y, t, V, posteriori, cl, ca, as1, ac1, as2, ac2] = ...
    sazonal(medida, periodo)
%
% Input: medida: Vetor com as medidas equiespaçadas;
%         período: Período para ser avaliado.
%
% Output: y,V: Vetores com a curva ajustada e vetor de residuos
%          t: Vetor temporal utilizado
%          posteriori: Variância a posteriori
%          cl, Ca: coeficientes linear e angular da reta ajustada
%          asn: n-esima Amplitude do Seno ajustado
%          acn: n-esima Amplitude do Cosseno ajustado
%
[linhas, colunas] = size(medida);
for i=1:linhas
    t(i,1)=i/periodo;
    A(i,1)=1;
    A(i,2)=t(i);
    A(i,3)=cos(2*pi*t(i));
    A(i,4)=sin(2*pi*t(i));
    A(i,5)=cos(4*pi*t(i));
    A(i,6)=sin(4*pi*t(i));
    L(i,1)=medida(i);
end;

X = inv(A' * A) * A' * L;
V = A * X - L;

[linhasA,colunasA] = size(A);

Posteriori = V' * V / (linhas - colunasA);
cl = X(1);
ca = X(2);
as1 = X(3);
ac1 = X(4);
as2 = X(5);
ac2 = X(6);

y = cl + ca * t + as1 * cos(2 * pi * t) + ac1 * sin(2 * pi * t) ...
    + as2 * cos(4 * pi * t) + ac2 * sin(4 * pi * t);

```