

JOSÉ AURÉLIO SILVA PEREZ

**CAMPO DE VELOCIDADE PARA AS ESTAÇÕES DA
RBMC E DO IGS LOCALIZADAS NA PLACA SUL-
AMERICANA: ESTIMATIVA A PARTIR DO
PROCESSAMENTO DE DADOS GPS**

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

Orientadores:

Prof. Dr. João Francisco Galera Monico

Prof. Dr. João Carlos Chaves

PRESIDENTE PRUDENTE

NOVEMBRO 2002

TERMO DE APROVAÇÃO

DADOS CURRICULARES

JOSÉ AURÉLIO SILVA PEREZ

Nascimento: 19/07/1974

Filiação: Francisco Perez Fernandes
Maria Alice Silva Perez

1994-1999: Curso de Graduação
Bacharelado em Geofísica
Instituto Astronômico e Geofísico – USP

2000-2002: Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, nível de
Mestrado, na Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

DEDICATÓRIA

O presente trabalho é dedicado a toda minha família, em especial a meus pais, Francisco e Maria Alice, pela educação e lição de vida que destes herdei; à querida Dani, por seu companheirismo e pelo amor que me foi dado, durante a árdua realização desta pesquisa; a Deus, por razões que nem preciso citar.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo), pelo apoio financeiro concedido, de fundamental importância na contribuição para o sucesso deste projeto.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. João Francisco Galera Monico, pela experiência acadêmica de caráter altamente profissional que por ele me foi transmitida, bem como pelo conhecimento sobre GPS que incorporei à minha formação.

Ao meu co-orientador, o Prof. Dr. João Carlos Chaves, e ao companheiro e Mestre em Ciências Cartográficas, Luiz Fernando Sapucci, pessoas com quem adquiri enorme experiência no manuseio do *software* GIPSY-OASIS II, transmitida sempre com muita dedicação.

Aos professores que compuseram a banca do meu exame de qualificação, Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas (UFPR – Universidade Federal do Paraná) e Prof (a). Dr (a). Tereza Higashi Yamabe (FCT – UNESP), pela valiosíssima contribuição com as correções ao relatório de qualificação e recomendações para o desenvolvimento do projeto como um todo.

Aos professores do IAG (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas) da USP, Prof. Dr. Eder Cassola Molina, Prof (a). Dr (a).

Leila Soares Marques, pelos ensinamentos transmitidos atualmente e durante minha graduação e, de forma especial, ao Prof. Dr. Nelsi Côgo de Sá, pelas dicas sobre referências bibliográficas e pelo conhecimento fundamental que atualmente tenho sobre Geodésia.

Ao Prof. Edvaldo Simões da Fonseca Junior, do Departamento de Transportes (PTR) da Escola Politécnica da USP, pela cessão da conta numa estação de trabalho, possibilitando o acesso às efemérides do JPL.

Ao Analista de Sistemas Milton Hirokazu Shimabukuro, que ampliou significativamente meus conhecimentos sobre o sistema operacional UNIX, contribuindo diretamente no desenvolvimento de uma metodologia para processamento contínuo de dados GPS.

Ao Prof. Maurício Galo, pelas instruções importantes sobre o *software* GNUPLOT e pela rotina que possibilitou gerar graficamente o campo de velocidade das estações.

Ao companheiro de mestrado, André Luís Pereira de Castro, pelas dicas e soluções de problemas computacionais, no aprimoramento de alguns trabalhos.

Aos Engenheiros Kátia Duarte Pereira, do IBGE, e Jardel Aparecido Fazan, da FCT/UNESP (recém concursado do IBGE), pela disponibilização dos dados das estações da RBMC.

Pelo companheirismo e amizade de vários alunos, professores e funcionários, dentre os quais: José Aguiar de Lima Junior (Zito), pernambucano “arretado”, parceiro de convivência na República *Zé land*; Giovane Maia do Vale, João Bosco Nogueira Junior, Marcelo Tomio Matsuoka, Meire Lúcia Espinhosa, Ítalo Tsuchiya, Edmur Pugliesi, Cássio Aparecido de Carvalho, Adilson Nalin Luiz (Geografia), Mário Luís Lopes Reiss, Daniel Rodrigues dos Santos, Wagner Carrupt Machado (Wagninho), todos companheiros ou ex-companheiros de mestrado, e vários outros colegas e amigos com os quais a interação é, ou foi, menos freqüente; professores Paulo, Amorim, Mauro e Tavico; Paulão, o “churrasqueiro oficial” das pitorescas festas na garagem; Dona Cida, a paciente

faxineira da sala de permanência dos alunos de pós-graduação; Dona Neusa, a fazedora do café “nosso de cada dia”.

E, finalmente, a todos os que direta ou indiretamente, me auxiliaram de alguma forma, contribuindo, não somente com sua cultura intelectual, mas também com uma compreensão indiscutível.

Agradeço a Deus.

EPIÍGRAFE

Pesquisa científica não é um amontoado aleatório de conhecimentos.

Pesquisar cientificamente é saber compartilhar não somente o conhecimento, mas a árdua experiência adquirida nas derrotas e nas vitórias.

Pesquisar inteligentemente é saber administrar o próprio sofrimento e, com base nele, produzir algo útil para si mesmo e/ou para os outros.

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

RESUMO

Atualmente, com a evolução das tecnologias desenvolvidas para fins de posicionamento, especialmente nos casos que envolvem Geodésia Espacial, várias outras aplicações dessas tecnologias surgem a partir de pesquisas desenvolvidas por vários cientistas. Neste contexto, o GPS (*Global Positioning System*) destaca-se de forma impressionante, não só pela variada gama de aplicações em que pode ser utilizado, mas também pela precisão e acurácia dos resultados que podem ser obtidos pelo mesmo. Desta forma, o GPS como “ferramenta” para a Geodinâmica torna-se vital em aplicações que requerem alta precisão, tais como: monitoramento e análise de movimento e deformação das placas litosféricas, previsão de terremotos em regiões sismicamente ativas, entre outras. Um método bastante eficiente nestes casos é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), adequado para a utilização de produtos GPS disponibilizados pelo IGS (*International GPS Service*) ou pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Além disso, existem *softwares* adequados para esse tipo de posicionamento, bem como para a utilização dos produtos fornecidos pelo IGS e JPL. Este trabalho envolve, basicamente, a utilização do Posicionamento por Ponto Preciso para o processamento de dados de estações geodésicas, no intuito de se obter um campo de velocidades dessas estações, em nível intercontinental. Para tanto, torna-se necessário um prévio embasamento sobre os principais fenômenos geodinâmicos relacionados ao movimento de placas litosféricas, bem como uma fundamentação teórica sobre as observáveis envolvidas no GPS e as possíveis fontes de erro nele atuantes. Para analisar a acurácia dos resultados, devem ser feitas comparações entre a solução geodésica final obtida e os resultados fornecidos por outras fontes geodésicas e modelos geofísicos de movimento de placas. Todo esse procedimento foi realizado neste trabalho, obtendo-se resultados preliminares para o campo de velocidade das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e algumas do IGS localizadas em placas vizinhas à Placa Sul-Americana.

Palavras Chave: GPS; Geodinâmica; Placas Litosféricas; Posicionamento por Ponto Preciso.

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

ABSTRACT

Nowadays, with the evolution of the technologies related to positioning, specially those involved with Spatial Geodesy, several applications of these technologies arose from the researches carried out by several scientists. In this context, the GPS (Global Positioning System) has been widely emphasized, not only because of the amount of applications in which it can be used, but also because of the precision and accuracy of the results that can be obtained. Thus, GPS as “tool” for Geodynamics becomes essential in applications where high precision is required, such as monitoring and analysis of movements and deformations of the tectonic plates, prevision of earthquakes at seismically active regions, and others. A method very efficient in these cases is the Precise Point Positioning (PPP), which is suitable for using the GPS products available by IGS (International GPS Service) or JPL (Jet Propulsion Laboratory). Moreover, there are appropriated softwares for applying this method of positioning, as well as for using products provided by IGS and JPL. The present work involves, basically, the use of PPP to processing a set of geodetic stations data, in order to obtain the velocity’s field of these stations involved in an intercontinental scope. In order to reach this aim, it was necessary a previous basis about the main geodynamic phenomena related to the tectonic plate’s movement, as well as the theoretical basis concerning the GPS observables and the possible sources of errors acting on them. In order to analyze the accuracy of the results, comparisons between the final geodetic solution and the results provided by others geodetic sources and geophysical models of plate movements have to be carried out. This procedure has been made in the present work, and preliminary results were obtained for the velocity’s field of the RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) stations and of some IGS stations located at plates surrounding the South American Plate.

Keywords: GPS; Geodynamics; Tectonic Plates; Precise Point Positioning.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE SIGLAS	17
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Caracterização do assunto.....	20
1.2 Objetivos	21
1.3 Justificativa	22
1.4 Conteúdo da pesquisa	23
2 FUNDAMENTOS DE GEODINÂMICA E DE GPS.....	25
2.1 Movimentos Crustais Intra e Interplacas Litosféricas	26
2.1.1 Introdução à Tectônica de Placas.....	27
2.1.2 Sismologia.....	28
2.1.3 Espalhamento do Fundo Oceânico (Geomagnetismo)	28
2.1.4 Convecção Termal no Manto	28
2.1.5 Modelagem Atual da Tectônica de Placas.....	30
2.2 O GPS Aplicado à Geodinâmica (Monitoramento Contínuo)	31
2.2.1 Observáveis GPS.....	34
2.2.1.1 Pseudodistância	35
2.2.1.2 Fase da Onda Portadora	37
2.2.2 Erros Envolvidos nas Observáveis GPS.....	38
2.2.2.1 Fontes de Erros nos Satélites GPS	39
2.2.2.2 Fontes de Erros na Propagação do Sinal GPS	40
2.2.2.2.1 Refração Troposférica	40
2.2.2.2.2 Refração Ionosférica	42
2.2.2.2.3 Outros Erros que Afetam a Propagação do Sinal	44
2.2.2.3 Fontes de Erros no Receptor/Antena GPS.....	47
2.2.2.4 Fontes de Erros na Estação GPS.....	49
2.2.2.4.1 Marés Terrestres (<i>Earth Body Tides</i>)	49
2.2.2.4.2 Carga dos Oceanos (<i>Ocean Loading</i>).....	53
2.2.2.4.3 Carga da Atmosfera.....	54
2.2.3 GPS e Geodinâmica.....	55
2.2.3.1 Monitoramento de Movimentos Crustais.....	55
2.2.3.1.1 Contribuição da Tecnologia GPS.....	57
2.2.3.1.2 Marés Terrestres e Marés Oceânicas.....	62

2.2.3.2 Monitoramento do Movimento do Pólo e da Rotação da Terra	63
3 REFERENCIAIS E POSICIONAMENTO COM GPS	66
3.1 Sistemas de Referência Celeste e Terrestre Convencionais	67
3.2 Sistemas de Tempo	69
3.3 ITRF	70
3.3.1 Características do ITRF e suas Soluções	71
3.3.2 Transformação de Similaridade.....	77
3.4 WGS 84.....	79
3.5 Sistema de Referência Geodésico Local	80
3.6 Posicionamento GPS de Alta Precisão	82
3.6.1 Posicionamento por Ponto (Absoluto)	82
3.6.1.1 Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)	83
4 METODOLOGIA	86
4.1 Software	86
4.2 Dados Utilizados	88
4.3 Processamento dos Dados GPS	94
4.3.1 Estratégia de Processamento.....	98
4.4 Estimativa da Velocidade das Estações (Ajustamento da Rede)	99
5 RESULTADOS E ANÁLISES	106
5.1 Análise das Soluções Finais Obtidas com o Software GOA II.....	108
5.2 Comparação com Soluções ITRF e Modelos Geofísicos	115
5.3 Análise da Influência da Escolha da Época de Referência.....	139
6 COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
APÊNDICES.....	152

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Estações da RBMC e do IGS utilizadas no processamento	89
TABELA 4.2 – Épocas de dados para 1998 (período: 28 de junho a 12 de julho)	91
TABELA 4.3 – Épocas de dados para o primeiro semestre de 1999 (período: 28 de março a 11 de abril).....	91
TABELA 4.4 – Épocas de dados para o segundo semestre de 1999 (período: 19 de setembro a 3 de outubro).....	92
TABELA 4.5 – Épocas de dados para o primeiro semestre de 2000 (período: 19 de março a 2 de abril).....	92
TABELA 4.6 – Épocas de dados para o segundo semestre de 2000 (período: 17 de setembro a 1 de outubro).....	93
TABELA 4.7 – Épocas de dados para 2001 (período: 18 de março a 1 de abril).	93
TABELA 5.1 – Coordenadas cartesianas das estações e respectivos desvios-padrão.....	108
TABELA 5.2 – Velocidades cartesianas das estações e respectivos desvios-padrão	109
TABELA 5.3 – Velocidades e respectivos desvios-padrão em termos das componentes N, E, u	114
TABELA 5.4 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final do trabalho e as fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000.....	116
TABELA 5.5 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97 (2000,2).....	119
TABELA 5.6 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000/97	121
TABELA 5.7 – Velocidades angulares segundo os modelos NNR-NUVEL 1A e APKIM 2000	123
TABELA 5.8 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as fornecidas pelos modelos geofísicos	124

TABELA 5.9 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000/97, em termos das componentes do sistema local.....	127
TABELA 5.10 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as fornecidas pelos modelos geofísicos, em termos das componentes do sistema local.....	129
TABELA 5.11 – Vetores de Euler para a Placa SOAM	139
TABELA 5.12 – Precisão dos parâmetros para diferentes épocas t de referência	141

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Formação de um vale de <i>rift</i> . As setas mais finas indicam as falhas normais.....	29
FIGURA 2.2 – Movimento relativo entre B e A, definido pela velocidade angular em torno de P	32
FIGURA 4.1 – Localização das estações utilizadas no processamento.....	90
FIGURA 4.2 – O arquivo em lote <i>v_gipsy</i>	96
FIGURA 4.3 – Trecho do arquivo em lote <i>semiaut</i>	97
FIGURA 4.4 – Arquivo <i>bias_free.stacov</i>	99
FIGURA 5.1 – Desvios-padrão das coordenadas, à época 19 de março de 2000 ($t = 2000,2$)	110
FIGURA 5.2 – Desvios-padrão das velocidades, à época 19 de março de 2000 ($t = 2000,2$)	110
FIGURA 5.3 – Desvios-padrão das coordenadas (N, E, u) das estações.....	112
FIGURA 5.4 – Repetibilidade das coordenadas (N, E, u) das estações.....	113
FIGURA 5.5 – Desvios-padrão das velocidades (V_N , V_E , V_u) das estações.....	115
FIGURA 5.6 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final e as do ITRF 97.....	117
FIGURA 5.7 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final e as do ITRF 2000.....	117
FIGURA 5.8 – Discrepâncias entre as coordenadas da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97 (2000,2)	120
FIGURA 5.9 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as do ITRF 97.....	122
FIGURA 5.10 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97	122
FIGURA 5.11 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as do modelo NNR-NUVEL 1A	125
FIGURA 5.12 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as do modelo APKIM 2000.....	125

FIGURA 5.13 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as do ITRF 97, em termos das componentes do sistema local.....	128
FIGURA 5.14 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97, em termos das componentes do sistema local.....	128
FIGURA 5.15 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as do modelo NNR-NUVEL 1A, em termos das componentes do sistema local	130
FIGURA 5.16 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as do modelo APKIM 2000, em termos das componentes do sistema local.....	130
FIGURA 5.17 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pela solução ITRF 97.....	133
FIGURA 5.18 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pela solução ITRF 2000.....	134
FIGURA 5.19 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pelo modelo geofísico NNR-NUVEL 1A.....	135
FIGURA 5.20 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pelo modelo geofísico APKIM 2000.....	136
FIGURA 5.21 – Localização das estações que apresentaram discrepâncias mais elevadas com relação aos modelos geofísicos	137
FIGURA 5.22 – Influência da escolha da época de referência na precisão dos parâmetros.....	142

LISTA DE SIGLAS

APKIM-2000 -	<i>Actual Plate Kinematic Model – version 2000</i>
BIH -	<i>Bureau International de l'Heure</i>
BTS -	<i>BIH Terrestrial System</i>
C/A -	<i>Clear/Aquisition</i>
CASA -	<i>Central and South America</i>
CCRS -	<i>Conventional Celestial Reference System</i>
CTP -	<i>Conventional Terrestrial Pole</i>
CTRF -	<i>Conventional Terrestrial Reference Frame</i>
CTRS -	<i>Conventional Terrestrial Reference System</i>
CTS -	<i>Conventional Terrestrial System</i>
DGFI -	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
DMA -	<i>Defense Mapping Agency</i>
DoD -	<i>U. S. Department of Defense</i>
DORIS -	<i>Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite</i>
ECI -	<i>Earth-Centered Inertial</i>
EOP -	<i>Earth Orientation Parameters</i>
ERP -	<i>Earth Rotation Parameters</i>
FCT -	<i>Faculdade de Ciências e Tecnologia</i>
GAS -	<i>GPS Analysis Software</i>
GEONET -	<i>GPS Earth Observation NETwork</i>
GIPSY OASIS -	<i>GPS Inferred Positioning SYstem – Orbit Analysis and Simulation Software</i>
GOA II -	<i>GIPSY OASIS II</i>
GPS -	<i>Global Positioning System</i>
GRS 80 -	<i>Global Reference System 1980</i>
GST -	<i>Greenwich Sideral Time</i>
IBGE -	<i>Fundação Instituto de Geografia e Estatística</i>
ICRF -	<i>IERS Celestial Reference Frame</i>

IERS -	<i>International Earth Rotation Service</i>
IGS -	<i>International GPS Service</i>
IONEX -	<i>IONosphere Exchange format</i>
ITRF -	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS -	<i>International Terrestrial Reference System</i>
JPL -	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LGE -	Laboratório de Geodésia Espacial
LLR -	<i>Lunar Laser Ranging</i>
MATLAB -	<i>Matrix Laboratory</i>
MMQ -	Método dos Mínimos Quadrados
MVC -	Matriz Variância-Covariância
NIMA -	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NNR-NUVEL 1A -	<i>No Net Rotation - Northwestern University VELocity model 1A</i>
PPP -	<i>Precise Point Positioning</i> (Posicionamento por Ponto Preciso)
PRN -	<i>Pseudo Random Noise</i>
QUASAR -	<i>Quase Stellar Radio Source</i>
RBMC -	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX -	<i>Receiver Independent Exchange format</i>
RNAAC -	<i>Regional Network Associate Analysis Centers</i>
RTK -	<i>Real-Time Kinematic</i>
SA -	<i>Selective Availability</i> (Disponibilidade Seletiva)
SAD 69 -	<i>South American Datum of 1969</i>
SCIGN -	<i>Southern California Integrated GPS Network</i>
SGB -	Sistema Geodésico Brasileiro
SIRGAS -	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLR -	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SRIF -	<i>Square Root Information Filter</i>
SSCs -	<i>Set of Station Coordinates</i>
TDB -	Tempo Dinâmico Baricêntrico

TDP -	<i>Time Dependent Parameter</i>
TEC -	<i>Total Electron Contents</i>
Topex -	<i>Topography Experiment</i>
TU -	Tempo Universal
UNESP -	Universidade Estadual Paulista
USP -	Universidade de São Paulo
UTC -	<i>Universal Time Coordinate</i>
VLBI -	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>
WGS 84 -	<i>World Geodetic System 1984</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do assunto

Com base em estudos geológicos e geofísicos, até a criação da teoria da Tectônica de Placas, desenvolvida na década de 70, sabe-se que a litosfera terrestre, ao longo das eras geológicas, foi se segmentando em diversos blocos que, atualmente, recebem a denominação de Placas Litosféricas. Essa segmentação decorre dos aspectos geodinâmicos aos quais a Terra está permanentemente sujeita, fazendo com que tais placas se movimentem continuamente em diferentes direções e com diferentes magnitudes, de acordo com a região em que estão localizadas. Em decorrência deste movimento, as coordenadas geodésicas de um ponto situado sobre uma das placas litosféricas variam e, conseqüentemente, tornam-se dependentes da época na qual tais informações foram obtidas. Se estes elementos (direção e magnitude) forem conhecidos, pode-se determinar a variação das coordenadas dos pontos localizados sobre as placas, em função do tempo.

O monitoramento das deformações crustais, decorrentes do movimento das placas litosféricas, através da medição periódica de pontos que constituem as redes geodésicas, sempre foi um sonho dos pesquisadores envolvidos em várias especialidades da Geodinâmica (deformação tectônica, rotação da Terra, movimento do pólo, etc.). Esse sonho começou a se tornar realidade na década de 60, com o desenvolvimento da técnica VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), e de outras técnicas espaciais de posicionamento na década de 70 (*Doppler*, SLR - *Satellite Laser Ranging*). Na década de 80 (SÁ, 1999, p. 82), surgiu o sistema GPS (*Global Positioning System*), constituindo uma técnica ideal, sobretudo para aplicações regionais, por usar equipamento de baixo custo, portátil e altamente preciso.

A contribuição da técnica GPS nos estudos de Geodinâmica, juntamente com as técnicas VLBI e SLR, se tornou efetiva com a operacionalização da rede mundial de estações IGS (*International GPS Service*), em 1994. Existem, atualmente, mais de 400 estações que compõem tal rede,

fornecendo informações muito valiosas no que diz respeito ao monitoramento das coordenadas das estações com relação ao tempo. Vários pesquisadores de instituições internacionais reuniram esforços dedicados ao processamento diário dos dados das estações IGS. Posteriormente, estes resultados são combinados em diferentes épocas, possibilitando assim, a estimativa do vetor velocidade para as respectivas estações.

A RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) é uma estrutura nacional com as mesmas características da rede IGS, estando em plena atividade desde agosto de 1997 (FORTES, 1997). A análise da variação temporal das coordenadas de suas estações e de outras estações IGS, pelo processamento dos dados GPS em um *software* científico (caracterizado por uma utilização, em geral, limitada a meios acadêmicos, excluindo, de certa forma, a intenção de comercializá-lo), possibilita um tratamento mais refinado aos dados, proporcionando uma estimativa do vetor velocidade das estações, com qualidade provavelmente superior às estimativas fornecidas por modelos geofísicos de movimento de placas.

Portanto, utilizando os resultados fornecidos pelo processamento das estações da RBMC e do IGS, podem ser realizadas comparações com os modelos geofísicos de movimento de placas, contribuindo, desta forma, com informações atualizadas, além de mais precisas, sobre o comportamento dinâmico das placas litosféricas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é estimar o campo de velocidades para as estações da RBMC e do IGS, localizadas na Placa Sul-Americana. Para tanto, são processados dados de 21 estações¹ localizadas tanto nessa placa quanto em vizinhas, haja vista a importância de se considerar a influência das outras placas no movimento da Placa Sul-Americana.

¹ Inicialmente, estava previsto o processamento dos dados de 37 estações. Entretanto, em razão de alguns problemas, mencionados na seção (4.2), decidiu-se considerar apenas 21 estações.

Adicionalmente, os resultados obtidos são comparados com modelos geofísicos de movimento de placas, tais como o NNR-NUVEL 1A (*No Net Rotation – Northwestern University VELOCITY model 1A*) e o APKIM 2000 (*Actual Plate Kinematic Model – version 2000*).

Como objetivos secundários, pode-se citar os seguintes:

- Pesquisar as correções que devem ser aplicadas aos vários efeitos, tais como marés terrestres, carga dos oceanos, carga da atmosfera e refrações troposférica e ionosférica;
- Desenvolver uma metodologia para o processamento contínuo das estações GPS brasileiras ativas².

1.3 Justificativa

Atualmente, o interesse no conhecimento contínuo das coordenadas precisas de pontos (ou marcos, ou estações) localizados sobre a superfície da Terra é cada vez maior, principalmente quando se trata de uma situação em que tais pontos não são estáticos, mas mudam de posição, em virtude não somente das deformações causadas por interações geodinâmicas inter e intraplacas, mas de outros tipos de perturbações. Tal conhecimento se torna essencial para a determinação do vetor velocidade das estações, o qual, por sua vez, é o indicador mais confiável que se assemelha ao verdadeiro percurso da estação, de uma época para outra. Neste contexto, o monitoramento contínuo das estações permite estimar parâmetros mais precisos e eficientes (maior qualidade) para o estabelecimento dos parâmetros de movimento das placas litosféricas, gerando resultados muito importantes e de grande interesse para várias classes de pesquisadores, quer seja em nível nacional ou internacional.

No Brasil, no momento, é um assunto de extrema importância, haja vista que a adoção de um referencial geocêntrico para as Américas (SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) torna-se iminente.

² Estações que coletam dados continuamente, tais como as da RBMC.

Necessita-se, portanto, de um modelo que permita prever e recuperar o campo de velocidade de qualquer estação localizada no território nacional ou continental.

1.4 Conteúdo da pesquisa

Este trabalho está dividido em seis capítulos. A seguir, é feita uma breve descrição a respeito de cada um deles.

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

Neste capítulo, transmite-se uma idéia geral do assunto envolvido na realização do projeto, descrevendo-se um breve histórico sobre os estudos referentes à movimentação das placas litosféricas, com enfoque especial à evolução de tais pesquisas anteriormente ao advento do GPS. Menciona-se também o surgimento e a importância de estruturas essenciais para a maior parte dos projetos que envolvem o uso da tecnologia GPS, tais como o IGS e, em especial para o Brasil, a RBMC. Por fim, propõe-se a comparação de resultados provenientes de diferentes fontes de pesquisa.

São também apresentados os objetivos principal e secundários do projeto, bem como a justificativa de sua realização e o conteúdo da pesquisa.

Capítulo 2: FUNDAMENTOS GEOFÍSICOS E UTILIZAÇÃO DO GPS

O segundo capítulo se incumbe de apresentar a teoria básica sobre Geofísica (direcionada à Geodinâmica) e a tecnologia GPS, necessária para o bom entendimento do trabalho. Para tanto, são descritos alguns conceitos fundamentais inerentes à teoria da Tectônica de Placas e sobre as observáveis GPS e os erros envolvidos nestas, bem como algumas aplicações dessa tecnologia em Geodinâmica.

Capítulo 3: REFERENCIAIS E POSICIONAMENTO COM GPS

O terceiro capítulo complementa a fundamentação teórica do trabalho, apresentando conceitos e características básicos sobre os principais sistemas de referência envolvidos no posicionamento com GPS. Encerra-se o capítulo, enfatizando o método de posicionamento utilizado na pesquisa.

Capítulo 4: METODOLOGIA

Este capítulo descreve sobre o *software* e os dados utilizados, bem como a forma pela qual tais dados são processados, ou seja, qual a técnica de processamento que está sendo empregada. Em seguida, discorre-se sobre o ajustamento da rede intercontinental, mencionando-se o modelo, bem como o método de ajustamento utilizado. Finaliza-se o capítulo, descrevendo-se a maneira como é feita a estimativa da velocidade das estações.

Capítulo 5: RESULTADOS E ANÁLISES

O quinto capítulo apresenta, basicamente, os resultados dos processamentos, permitindo que se analise qualitativa e quantitativamente os valores obtidos para as coordenadas e velocidades das estações; bem como comparações com valores fornecidos por outras soluções geodésicas e modelos geofísicos.

Capítulo 6: COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Finalmente, o sexto e último capítulo exhibe as conclusões finais obtidas, com relação a diversos fatores, entre eles: o das precisões obtidas pelas diferentes soluções (geodésicas e geofísicas), bem como da compatibilidade entre elas; o da eficiência da técnica específica de processamento aplicada a fenômenos que requerem resultados com alta precisão e acurácia; entre outros.

Adicionalmente, são feitas recomendações para futuras pesquisas desenvolvidas nesta área.

2 FUNDAMENTOS DE GEODINÂMICA E DE GPS

A Geodésia Clássica se baseia no princípio de redes geodésicas de coordenadas “fixas” (invariáveis com o tempo), para descrever a forma e a superfície terrestre. À medida que as observações geodésicas foram melhorando sua precisão, alcançando o nível centimétrico, as coordenadas das estações geodésicas passaram a ser dependentes do tempo (COSTA, 1999, p. 111). Assim, deve-se considerar suas variações, decorrentes de movimentos (e, às vezes, deformações) que se manifestam na superfície da Terra. Esta relação de dependência das coordenadas com o tempo é representada pelos modelos de deformação da superfície terrestre.

Os modelos de deformação global são derivados de observações geofísicas e baseados na teoria da Tectônica de Placas, desenvolvida na década de 70. Eles fornecem velocidades de superfície em virtude da geometria de um conjunto de placas rígidas e estimam seus parâmetros como a rotação de uma capa esférica indeformável.

Os modelos de deformação regional vêm a representar as deformações intraplaca, ou seja, as deformações dentro das placas rígidas ao longo de falhas ativas e cadeias de montanhas (DREWES, 1993).

DIXON et al.³, citado por TORGE (1991, p. 206), já mencionava que medições efetuadas por meio de técnicas geodésicas como VLBI e GPS eram especialmente adequadas ao monitoramento de deformações regionais, considerando-se campanhas com coletas de dados de duração de poucos anos.

Entretanto, atualmente, tal fato não implica na impossibilidade de utilização do GPS em aplicações no âmbito global.

Recentes movimentos crustais (horizontais e verticais) são determinados pela repetição de medições geodésicas, realizadas em uma certa quantidade de épocas ou continuamente (TORGE, 2001, p. 355). Portanto, torna-

³ DIXON, T.; G. BLEWITT; K. LARSON; D. AYNEW; B. HAGER; P. KROGER; L. KRUMEGH; W. STRANGE. “GPS Measurements of regional deformation in southern California”. *EOS* **71**, 1051-1056, 1990.

se cada vez mais evidente a adoção de técnicas que permitem monitorar continuamente fenômenos ocorridos em escala global.

2.1 Movimentos Crustais Intra e Interplacas Litosféricas

O intuito desta seção não é, de forma alguma, esgotar o conhecimento sobre a teoria da Tectônica de Placas. Todavia, é importante frisar algumas propriedades da Terra responsáveis pela movimentação das placas litosféricas.

Os movimentos crustais intraplaca, como o próprio nome diz, são aqueles que ocorrem no interior da mesma, enquanto que os movimentos interplacas são freqüentemente identificados nas zonas de bordas de placas. De forma geral, os movimentos citados no último caso são mais freqüentes e intensos que os do primeiro, podendo envolver colisões, afastamentos, cisalhamentos e outros tipos de interações entre placas vizinhas.

Na Placa Sul-Americana, particularmente no Brasil, os movimentos crustais intraplaca são praticamente insignificantes, ou, melhor dizendo, imperceptíveis se comparados com regiões do globo tectonicamente mais ativas. Entretanto, nas zonas periféricas da placa, ocorrem movimentos relativos entre essa e as placas vizinhas, com diferentes direções, sentidos e magnitudes. Conseqüentemente, são gerados diversos tipos de estruturas geológicas, tais como dobras, falhas, entre outras.

Vale ressaltar que a deformação da crosta continental, globalmente, é um evento que ocorre no tempo geológico. Em outras palavras, as rochas “respondem” a estas forças, gerando dobramentos e falhamentos, tais como num episódio típico de formação de montanhas (PRESS & SIEVER, 1986, p. 525).

Em geral, a colisão de dois continentes é a maior causa do fenômeno de formação de montanhas. Tal fenômeno, quando associado aos eventos citados, é denominado Orogenia (TURCOTTE & SCHUBERT, 2001, p. 41). Caso semelhante pode ser verificado ao se analisar o processo de subducção

da Placa de Nazca na Placa Sul-Americana, causando a formação da Cordilheira dos Andes.

2.1.1 Introdução à Tectônica de Placas

A teoria da Tectônica de Placas está baseada principalmente em levantamentos geológicos e geofísicos que representam uma média sobre milhões de anos. Segundo Turcotte & Schubert (2001, p. 1), envolve modelos nos quais a parte mais externa da Terra é dividida em um certo número de placas, rígidas e relativamente delgadas, estando em contínua movimentação, umas em relação às outras.

Define-se Tectônica como o estudo da história de movimentos e deformações da Litosfera, numa escala regional a global. Esse estudo relaciona diversas disciplinas: Geologia Estrutural, Geofísica, Petrologia e Geoquímica, Estratigrafia, Sedimentologia, Paleontologia, etc.

O objetivo principal desse estudo é entender a cinemática e os processos termomecânicos que ocorrem na Terra e que explicam as observações existentes.

De acordo com o modelo de Tectônica de Placas, a porção mais superficial da Terra e denominada Litosfera, abrangendo a crosta e parte do manto superior, é dividida em placas litosféricas distintas. Essas placas movem-se umas em relação às outras, sendo criadas ao longo das dorsais meso-oceânicas e destruídas nas zonas de subducção, localizadas nas trincheiras oceânicas, onde mergulham no manto superior. Por esta razão, os continentes, que pertencem às placas litosféricas, derivam sobre a superfície terrestre.

Para entender o papel desempenhado pelas placas litosféricas na história geológica, é necessário compreender os processos operantes nos modernos regimes de movimento das placas (CONDIE, 1989, p. 131). Uma grande quantidade de informações que atualmente se conhece sobre a moderna Teoria da Tectônica de Placas provém de áreas de pesquisa da Geofísica, tais como Sismologia e Geomagnetismo. Além disso, dados geológicos, recuperados

em grandes projetos, nos quais se estudam bacias oceânicas, fornecem melhores injunções para a interpretação de dados geofísicos.

2.1.2 Sismologia

De forma bastante generalizada, a Sismologia pode ser entendida como o estudo das vibrações geradas por sismos ou grandes liberações de energia. Os sismos ocorrem, em sua grande maioria, ao longo de estreitos cinturões de zonas sísmicamente ativas; estes, por sua vez, demarcam as fronteiras entre as placas litosféricas.

Desde que um número suficiente de registros sísmicos e respectivos azimutes dos vetores de tais sismos esteja disponível, é possível determinar as direções do primeiro movimento (logo após a liberação de energia inicial) nos locais de geração (hipocentros) dos terremotos. Tais investigações são conhecidas como *estudos de primeiro movimento* ou *soluções de plano de falha*. Esses estudos, por sua vez, produzem melhores injunções sobre os movimentos das placas litosféricas (CONDIE, 1989, p. 140).

2.1.3 Espalhamento do Fundo Oceânico (Geomagnetismo)

Para compreender a evidência magnética do espalhamento do soalho oceânico, é necessário entender como as rochas vêm a ser magnetizadas no campo magnético da Terra. Quando uma rocha se forma, ela adquire uma magnetização paralela à do campo magnético terrestre naquela época, denominada magnetização primária. Conseqüentemente, informações sobre a direção e a intensidade do campo magnético com que a rocha se formou podem ser obtidas com base na análise de sua magnetização primária (CONDIE, 1989, p. 131). Maiores detalhes são apresentados na seção 2.1.5.

2.1.4 Convecção Termal no Manto

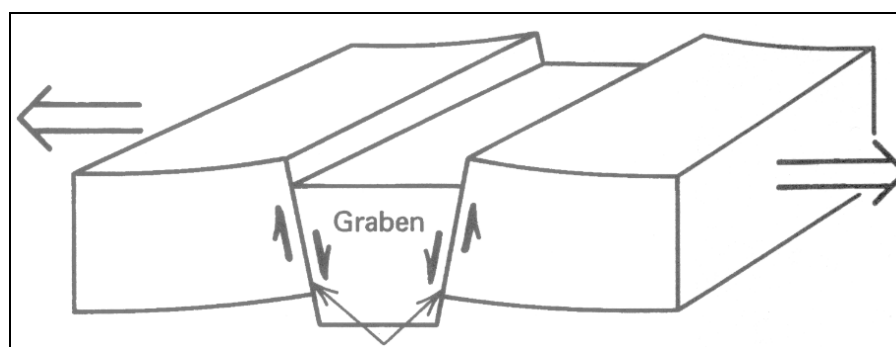
Press & Siever (1986, p. 499) mencionam que, em 1928, Artur Holmes invocou o mecanismo de convecção termal no manto como a força responsável pelo movimento das placas litosféricas. Afirmou, no entanto, que

idéias desse tipo eram puramente especulativas, podendo não ter valor científico até o momento em que adquirissem suporte suficiente para tornar tal evidência independente.

Evidências convincentes começaram a surgir como resultado de extensiva exploração do soalho oceânico, durante os anos que sucederam à Segunda Guerra Mundial.

Press & Siever (1986, p. 499) mencionam também que, no início da década de 60, Harry Hess, da *Princeton University*, sugeriu a teoria de que o soalho oceânico se segmenta ao longo de *rifts* nas dorsais meso-oceânicas, e que um novo soalho oceânico tende a se formar, em virtude da ascensão de material do manto por essas fendas, seguida de um espalhamento lateral desse material. Segundo Condie (1989, p. 77), sistemas de *rifts* são vales gerados por falhas fronteiriças, estendendo-se de 30 a 75 km em largura e de poucos milhares de km em comprimento, sendo caracterizados por um ambiente tectônico tensional no qual a taxa de expansão varia em torno de poucos milímetros ao ano.

A Figura 2.1 exemplifica a formação de um vale de *rift*, onde o bloco central do vale, conhecido como *Graben*, subsidir, e as extremidades dos blocos adjacentes são elevadas. As falhas que ocorrem nos flancos entre o Graben e os blocos adjacentes são conhecidas como falhas normais (TURCOTTE & SCHUBERT, 2001, p. 38).



FONTE: Adaptada de Turcotte & Schubert (2001, p. 39)

FIGURA 2.1 – Formação de um vale de *rift*. As setas mais finas indicam as falhas normais

No final da década de 60, tais evidências tornaram-se tão convincentes, que a maioria dos cientistas da Terra adotou esses conceitos.

Conseqüentemente, os conceitos de deriva continental e espalhamento do soalho oceânico foram vagarosamente sendo aceitos, simplesmente pelas idéias audaciosas que surgiram antes de se firmarem as evidências.

2.1.5 Modelagem Atual da Tectônica de Placas

A modelagem atual utilizada para fundamentar a teoria da Tectônica de Placas considera uma integração de fenômenos geológicos e geofísicos, entre os quais, os três citados anteriormente.

A primeira observação (talvez a mais evidente) sobre a qual está fundamentada a teoria da Tectônica de Placas é o espalhamento do soalho oceânico, gerado nas dorsais oceânicas, pela contribuição de um novo material que aflora na superfície, procedente das correntes de convecção térmica que se originam no manto (DREWES, 1993). Quando esse material se resfria a uma temperatura de aproximadamente 500°C (Temperatura de *Curie*), ele adquire uma magnetização paralela ao campo geomagnético daquela época. Como o campo geomagnético inverte sua polaridade em intervalos de milhares a milhões de anos, encontram-se rochas com magnetizações alternadas no fundo dos oceanos, na forma de tiras paralelas à cadeia meso-oceânica. Medindo a distância entre as tiras e estimando-se o tempo de magnetização, calcula-se a velocidade de espalhamento do soalho oceânico, representativa da velocidade relativa entre duas placas divergentes.

A cadeia meso-oceânica, sendo o eixo do espalhamento do soalho oceânico, não é uma linha contínua, mas interrompida por deslocamentos paralelos ao espalhamento. Estas linhas de deslocamento são denominadas falhas transformantes. Elas são de fundamental importância para a Tectônica de Placas, uma vez que seu azimute é a direção do movimento das placas, cuja medição pode ser considerada uma segunda e importante observação geofísica para fundamentação dessa teoria.

O terceiro e não menos importante grupo de observações é representado pelos azimutes de vetores de sismos. Os deslocamentos decorrentes

de um sismo não representam o movimento real de uma placa. Estima-se, nesse caso, a orientação de um plano de falha, a partir da análise de um mecanismo de foco. As soluções de plano de falha avaliam os registros de uma rede de estações sismológicas, determinando o azimute do vetor a partir de um movimento detectado inicialmente (DREWES, 1993).

Portanto, os três fenômenos explicados anteriormente (Sismologia, Espalhamento do Fundo Oceânico e Convecção Termal no Manto) formam a base geofísica dos modelos cinemáticos de placas litosféricas. Os dois primeiros fenômenos atuando como conseqüências (evidências) do movimento das placas litosféricas, e o terceiro fenômeno como o causador de tal movimento.

2.2 O GPS Aplicado à Geodinâmica (Monitoramento Contínuo)

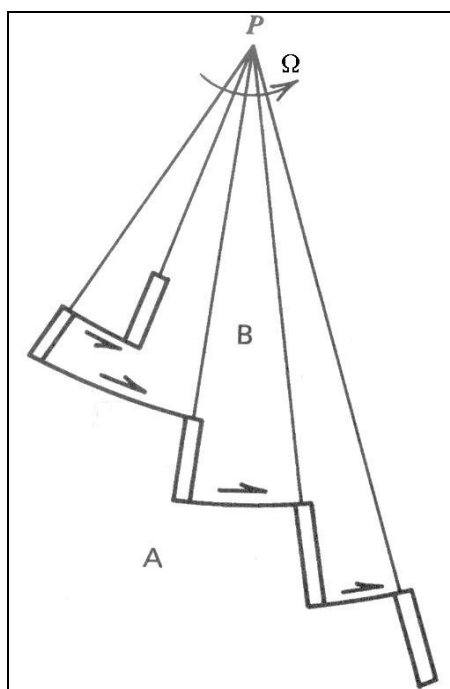
O movimento de uma placa sobre uma esfera pode ser descrito em termos de um pólo de rotação, cujo vetor passa pelo centro da esfera. Uma vez que as placas litosféricas movimentam-se relativamente umas às outras, a diferença angular entre um ponto dado sobre uma placa e o pólo de rotação da mesma geralmente varia com o tempo. Por esta razão, a trajetória de um ponto sobre uma placa, sendo “observada” a partir de um ponto localizado em outra placa, não pode ser descrita simplesmente por um pequeno círculo em torno de um pólo de rotação fixo. Nesse caso, a trajetória descrita nesse movimento relativo é representada por um cicloide esférico (CRONIN⁴ apud CONDIE, 1989, p. 151). Tal trajetória pode ser descrita se três variáveis forem conhecidas durante todo o tempo em que o ponto estiver se deslocando:

- a posição do pólo de rotação;
- a direção e o sentido do movimento relativo e
- a magnitude da velocidade angular.

O movimento relativo é descrito por um vetor de rotação denominado Vetor de Euler (vetor geocêntrico de rotação). O módulo do Vetor de Euler é proporcional à velocidade angular no extremo do vetor, localizado na

⁴ CRONIN, V. S. (1987) “Cycloid Kinematics of Relative Plate Motion”. **Geology**, 15, 1006-1009.

crosta terrestre, denominado Pólo de Euler (ou pólo de rotação) (DREWES, 1982, p. 71). Logo, tal movimento é completamente especificado quando são dadas a latitude e a longitude do pólo de rotação, juntamente com a velocidade angular de rotação (TURCOTTE & SCHUBERT, 2001, p. 32). A Figura 2.2 ilustra o movimento relativo entre duas placas litosféricas adjacentes A e B quaisquer.



FONTE: Adaptada de Turcotte & Schubert (2001, p. 33)

FIGURA 2.2 – Movimento relativo entre B e A, definido pela velocidade angular em torno de P

As linhas duplas, ilustradas nesta figura, representam segmentos da cadeia oceânica e permitem denotar as direções do movimento ao longo de falhas transformantes.

Os vetores de Euler estimados podem ser transformados em velocidades de estações e comparados com observações geodésicas.

Dessa forma, os movimentos das placas podem ser descritos pelos vetores de rotação geocêntricos, dados tanto pelas coordenadas geográficas (Φ, Λ) ($^{\circ}$) do pólo de rotação quanto pela velocidade angular Ω ($^{\circ}/\text{Ma}$ = graus por milhão de anos), ou pelas velocidades angulares em torno dos eixos cartesianos, $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ ($\text{rad}/10^9 \text{ a}$).

As velocidades de um ponto com coordenadas geográficas (φ, λ) ($^{\circ}$) ou coordenadas cartesianas (x, y, z) (em unidades de 1000 km) são então computadas por (DREWES, 1998):

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= \Omega \cos(\Phi) \sin(\lambda - \Lambda) \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \Omega [\sin(\Phi) - \cos(\lambda - \Lambda) \tan(\varphi) \cos(\Phi)] \\ \frac{dx}{dt} &= \omega_y z - \omega_z y \\ \frac{dy}{dt} &= \omega_z x - \omega_x z \\ \frac{dz}{dt} &= \omega_x y - \omega_y x\end{aligned}\quad , \quad (2.1)$$

onde $\frac{d\varphi}{dt}$ e $\frac{d\lambda}{dt}$ são dados em ($^{\circ}$ /Ma) e $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$ e $\frac{dz}{dt}$ dados em (mm/a).

Atualmente, o modelo geofísico mais indicado pela comunidade científica, podendo ser usado nas comparações com resultados de soluções geodésicas, é o NNR-NUVEL 1A, que combina variações de anomalias magnéticas, azimutes de falhas e vetores de sismos para estimar velocidades relativas das placas (De METS et al., 1990; 1994).

Este modelo, cuja versão anterior era denominada NNR-NUVEL 1, descreve as velocidades angulares relativas das 14 maiores placas litosféricas, tomando-se como referência, em geral, a Placa do Pacífico, ou seja, com todas as outras movimentando-se em relação a esta última (De METS et al., 1990, p. 426; 1994).

O NNR-NUVEL 1A é concebido sob o conceito de rede não-rotante, o qual parte da premissa de que não existem torques resultantes na Litosfera, ou seja, a integral de $\mathbf{v} \times \mathbf{r}$ sobre a superfície da Terra é igual a zero (onde $\mathbf{v}$ é a velocidade da placa na posição $\mathbf{r}$). Neste conceito, a interface Litosfera/Astenosfera é considerada uniforme (suave) e sem torques. Esta condição formal seria verdadeira se a Litosfera e a Astenosfera tivessem a mesma

espessura sobre toda a sua extensão no globo terrestre e não existissem variações laterais de viscosidade ao longo dessa interface estrutural. O fluxo astenosférico (material fundido proveniente do manto) também afeta os torques nas placas individuais que, em alguns casos, apresentam velocidades com diferentes direções (De METS et al., 1994).

Considerando o conceito de rede não rotante, estabelecido por esse modelo geofísico, a tecnologia de alta precisão do GPS vem contribuir significativamente, uma vez que é independente de tal premissa. É, portanto, muito mais sensível aos movimentos reais da Litosfera.

Comparativamente, deve-se optar também pela utilização de modelos cinemáticos de placas, gerados por observações geodésicas espaciais, obtidas por algumas técnicas como VLBI, SLR e GPS, descrevendo os movimentos das placas durante as últimas décadas. Um exemplo destes modelos é o APKIM 2000, desenvolvido no DGFI (*Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut*).

No que se refere à utilidade do GPS em Geodinâmica, convém mencionar, primeiramente e com certo rigor, a teoria básica sobre as observáveis GPS e os principais erros nelas embutidos.

2.2.1 Observáveis GPS

As observáveis básicas do GPS que permitem determinar posição, velocidade e tempo podem ser identificadas como (SEEBER, 1993, p. 247):

- Pseudodistância a partir do código; e
- Fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

A pseudodistância é a medida da distância entre a antena do satélite e a antena do receptor, referente às épocas de emissão e recepção dos códigos. A observável fase é a diferença entre a fase da portadora gerada pelo satélite (recebida pela antena do receptor) e sua réplica gerada pelo oscilador interno do receptor (LEICK, 1995, p. 248).

Deve-se salientar também que algumas combinações de observáveis básicas podem oferecer certas vantagens, dependendo, em geral, do tipo de posicionamento que se adota.

2.2.1.1 Pseudodistância

Inicialmente, convém mencionar a estrutura dos sinais transmitidos pelos satélites GPS. Cada satélite transmite dois sinais para os propósitos de posicionamento:

- O sinal L1, baseado na portadora com frequência de 1575,42 MHz e
- O sinal L2, com frequência de 1227,60 MHz.

Modulados na portadora L1 estão os dois códigos pseudo-aleatórios (PRN – *Pseudo Random Noise*) C/A (*Clear/Aquisition*) e Y, com duração de 1 ms (1,023 MHz) e uma semana (10,23 MHz), respectivamente. A denominação Y se refere ao código P criptografado. Sobrepostas à portadora L1 constam também as mensagens de navegação. A portadora L2 é modulada pelo código Y e pela mensagem de navegação.

Os códigos PRN possuem propriedades adicionais, haja vista serem únicos para cada satélite. Quando um receptor está processando os sinais de um satélite, é importante que os sinais recebidos simultaneamente de outros satélites não interfiram. Esses códigos foram especialmente escolhidos para resistir a tal interferência, mutuamente (LANGLEY, 1998, p. 117).

As medidas de distância entre o satélite e a antena do receptor baseiam-se nos códigos gerados no satélite e no receptor. Esse último gera uma réplica do código produzido no satélite. O retardo entre a chegada de uma transição particular do código, gerado no satélite, e a sua réplica, gerada no receptor, nada mais é que o tempo de propagação do sinal no trajeto entre o satélite e o receptor.

A pseudodistância (PD) é igual à diferença entre o tempo t_r registrado no receptor no instante de recepção do sinal, e o tempo t_s , registrado no satélite, no instante de transmissão do sinal, multiplicada pela velocidade da luz

no vácuo. A PD pode ser obtida via correlação com o código P (correlação do código Y) sobre as portadoras L1 e L2 e/ou com o código C/A, sobre a portadora L1 (TEUNISSEN & KLEUSBERG, 1998, p. 189).

$$PD_R^S = c\tau_r^s + c[dt_r - dt^s] + \varepsilon_{PD_r^s}, \quad (2.2)$$

onde τ_r^s é o tempo de propagação do sinal, contado desde sua geração no satélite até a correlação no receptor, c é a velocidade da luz e $\varepsilon_{PD_r^s}$ é o erro da medida de pseudodistância. Os termos dt_r e dt^s são, respectivamente, o erro do relógio do receptor e o erro do relógio do satélite, ambos em relação ao tempo GPS, nos respectivos instantes t_r e t^s .

O tempo de propagação τ_r^s multiplicado pela velocidade da luz no vácuo, não resulta na distância geométrica ρ_r^s entre a antena do satélite e a do receptor, em razão, entre outros fatores, da refração atmosférica (ionosfera (I_r^s) e troposfera (T_r^s)) e de efeitos de multicaminho (*multipath* = dm). Uma forma mais adequada para a equação (2.2) é:

$$PD_R^S = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r^s}. \quad (2.3)$$

As coordenadas do receptor e do satélite estão implícitas na distância geométrica ρ_r^s . Segundo Monico (2000), todos os termos do lado direito da equação (2.3) devem ser matematicamente descritos, pois representam o modelo matemático da pseudodistância. Qualquer termo modelado incorretamente resultará em erros nas coordenadas da antena do receptor. A técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva), que afeta as coordenadas e os relógios dos satélites, foi introduzida no sistema GPS visando degradar esse modelo, para os casos em que a pseudodistância é obtida via o código C/A. Convém, no entanto, salientar que a técnica SA está superada no momento, desde a sua desativação, anunciada pelo governo norte-americano, em maio de 2000.

2.2.1.2 Fase da Onda Portadora

Esta observável é muito mais precisa que a pseudodistância e considerada básica para a maioria das atividades geodésicas.

A fase da onda portadora $\phi_r^s(t)$ é igual à diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido pelo receptor $\phi^s(t)$, e a fase do sinal gerado no receptor $\phi_r(t)$. A fase observada $\phi_r^s(t)$ em um instante t , em ciclos, é dada por (KING⁵ et al. apud MONICO, 2000, p. 118):

$$\phi_r^s(t) = \phi^s(t) - \phi_r(t) + N_r^s + \varepsilon_{\phi_r^s}, \quad (2.4)$$

onde:

- t é o instante de recepção do sinal na estação $\mathbf{r}$;
- $\phi^s(t)$ é a fase da portadora gerada no satélite s e recebida na estação $\mathbf{r}$ no instante de recepção;
- $\phi_r(t)$ é a fase gerada no receptor no instante de recepção;
- N_r^s é a chamada ambigüidade da fase; e
- $\varepsilon_{\phi_r^s}$ é o erro da fase da onda portadora.

Os receptores medem a parte fracionária da portadora e efetuam a contagem do número de ciclos que entram no receptor a partir de então, resultando numa medida contínua. O termo N_r^s da equação (2.4) representa o número de ciclos (inteiros), da primeira época de observação, entre as antenas do satélite e do receptor, e é denominado ambigüidade. A medida da parte fracionária da fase da onda portadora tem precisão da ordem de até 10^{-3} do ciclo, o qual, por sua vez, possui comprimento de onda de aproximadamente 19 cm e 24 cm, para L1 e L2, respectivamente.

⁵ KING, R. W., MASTER, E. G., RIZOS, C., STOLZ, A., COLLINS, J. “*Surveying with GPS*”. **Monograph n.9**. School of Surveying, The University of New South Wales, Kensington, NSW, Australia, 1988.

Assim como na pseudodistância, os efeitos da refração atmosférica e do multicaminho, entre outros, devem ser considerados também para a fase da onda portadora.

2.2.2 Erros Envolvidos nas Observáveis GPS

Para realizar posicionamento de alta precisão, é indispensável um profundo conhecimento dos erros envolvidos em todo o processo. Desta forma, neste capítulo, são apresentados os erros envolvidos nas observáveis GPS, bem como formas de reduzi-los ou mesmo eliminá-los.

Segundo Seeber (1993, p. 289), de uma forma geral, os erros são introduzidos num processo de estimação de parâmetros se a modelagem for razoavelmente simples e não se adequar devidamente à realidade física. Por exemplo, o simples conceito de medição da pseudodistância se torna falho e complicado quando algumas circunstâncias físicas são consideradas, tais como:

- O sistema de referência geocêntrico (CTS – *Conventional Terrestrial System*) é fixo à Terra, não podendo ser considerado um sistema inercial;
- Os conceitos da Mecânica Newtoniana não podem ser estritamente aplicáveis, uma vez que devem ser considerados efeitos relativísticos;
- O sinal transmitido do satélite ao receptor não está se propagando no vácuo.

É necessário, portanto, corrigir as observações, as coordenadas e os relógios dos satélites, dos seguintes efeitos:

- rotação da Terra;
- efeitos relativísticos;
- efeitos de refração troposférica e ionosférica.

As observáveis GPS, tais como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático (funcional e estocástico) estabelecido deve ser válido para a realidade física que se

tenta descrever e capaz de detectar problemas. Dessa forma, as fontes de erros envolvidas nos processos de medidas devem ser bem conhecidas. Erros sistemáticos podem ser parametrizados (modelados como termos adicionais) ou eliminados por técnicas apropriadas de observação. Erros aleatórios, por sua vez, não apresentam nenhuma relação funcional com as medidas e são, normalmente, as discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros grosseiros e sistemáticos são eliminados ou minimizados. Eles são inevitáveis, sendo, portanto, considerados como propriedade inerente à observação (MONICO, 2000, p. 120).

Segundo Monico (1995, p. 19), há diversos erros que podem ser produzidos pelas seguintes fontes a considerar: os satélites, a propagação do sinal, o conjunto receptor/antena e a própria estação.

2.2.2.1 Fontes de Erros nos Satélites GPS

Os principais tipos de erros que podem ser gerados pelos satélites GPS são os erros orbitais e os erros no relógio do satélite. No posicionamento por ponto, os erros orbitais serão propagados diretamente para a posição do usuário. Embora altamente precisos, os relógios atômicos a bordo dos satélites não acompanham o sistema de tempo GPS. A diferença chega a ser, no máximo, de 1 milissegundo; entretanto, se forem utilizadas as correções contidas nas efemérides transmitidas, tal diferença pode ser apenas da ordem de 10^{-9} s (WELLS et al., 1986, p. 9.2). O valor pelo qual eles diferem do tempo GPS faz parte da mensagem de navegação, na forma de coeficientes de um polinômio de segunda ordem, dado por:

$$dt^s(t) = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2, \quad (2.5)$$

onde:

- $dt^s(t)$ é o erro do relógio no instante t da escala de tempo GPS;
- t_{oc} é o instante de referência do relógio (*clock*);

- a_0 é o estado do relógio no instante de referência;
- a_1 é a marcha linear do relógio; e
- a_2 é a variação da marcha do relógio.

Maiores informações podem ser obtidas em Monico (2000).

2.2.2.2 Fontes de Erros na Propagação do Sinal GPS

Os sinais GPS, em sua trajetória de propagação, da antena do satélite à antena do receptor, estão sujeitos a alguns efeitos, provocados pelos diferentes meios nos quais se propagam.

Segundo Seeber (1993, p. 35), esses sinais se propagam através da atmosfera dinâmica, atravessando camadas de diferentes naturezas e estados variáveis. Assim, sofrem diferentes tipos de influências, que provocam variações na direção e na velocidade de propagação, na polarização e na potência do sinal.

De forma geral, o meio no qual ocorre a propagação consiste, essencialmente, da troposfera e da ionosfera, cada uma com características bem diferentes.

2.2.2.2.1 Refração Troposférica

A troposfera se estende da superfície terrestre até aproximadamente 50 km.

O efeito da troposfera pode variar de poucos metros até aproximadamente 30 m, dependendo da densidade da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite (MONICO, 2000, p. 127). Tal efeito ocorre sempre no sentido de retardamento do sinal.

Desde o início da utilização de modelos para determinar distâncias, através de ondas eletromagnéticas, já se estudavam as influências do meio em que elas se propagavam, e formas de reduzi-las. Em consequência disso, hoje já se conhecem vários efeitos causados pela atmosfera terrestre sobre as ondas eletromagnéticas, e uma grande variedade de modelos matemáticos foi desenvolvida ao longo desse período. Entre os efeitos, pode-se citar (SPILKER & PARKINSON, 1996a, p. 52):

- Atenuação atmosférica;
- Cintilação troposférica; e
- Atraso troposférico.

A atenuação atmosférica é a diminuição da potência da onda eletromagnética, exercida por um dos elementos que constituem a atmosfera, sendo esse elemento diferente para cada frequência. Em bandas de frequência de 1 a 2 GHz, como é o caso dos sinais GPS, a atenuação é exercida predominantemente pelo oxigênio (SPILKER, 1996b, p. 520).

A cintilação é uma oscilação na amplitude da onda eletromagnética, causada por irregularidades e variações bruscas no índice de refatividade troposférica. Os efeitos da cintilação nos sinais GPS são as alterações na fase de batimento da onda portadora no receptor.

Para pequenos ângulos de elevação do satélite e curta fração de tempo de coleta de dados, a atenuação e a cintilação podem ser significativas, mas, para ângulos acima de 10° e períodos de dados relativamente longos, tais efeitos são irrisórios, sendo frequentemente negligenciados. Isso já não ocorre com o atraso troposférico, que gera erros nas observações GPS em maiores proporções e, por isso, deve ser tratado de forma adequada. O atraso troposférico é o atraso causado pela variação do índice de refração dos gases atmosféricos, em relação ao espaço livre. Entende-se por índice de refração o valor com que se mede a capacidade de um meio causar mudanças na direção e velocidade de uma onda eletromagnética que por ele se propaga.

Existem dois grandes atrasos ocasionados pela troposfera. O primeiro, e maior, é gerado pela influência da atmosfera hidrostática, principalmente pela influência do nitrogênio e do oxigênio. O segundo efeito é ocasionado pela atmosfera úmida, ou seja, pela influência do vapor d'água atmosférico (SPILKER, 1996b, p. 524). Assim, tem-se o atraso troposférico na direção zenital que, devido ao comportamento diferenciado dos gases hidrostáticos e do vapor d'água, é dividido em atraso zenital da componente hidrostática e atraso zenital da componente úmida.

Atualmente, existem diversas maneiras de minimizar os efeitos causados pela influência da troposfera nos sinais de radiofrequência. Enquanto alguns fornecem apenas valores aproximados, outros geram resultados com boa precisão. A seleção da estratégia a ser utilizada em uma dada aplicação GPS depende da precisão fornecida pelo método de posicionamento empregado.

A estratégia mais sofisticada para a determinação dos valores do atraso zenital troposférico é obtida a partir do ajustamento das observações GPS, utilizando o Filtro de Kalman e outros filtros baseados nas condições estado-espço-tempo dos parâmetros referentes ao atraso troposférico.

Uma estratégia que tem apresentado bons resultados no processamento de linhas de base longas envolve a aplicação de modelos matemáticos, e os resíduos dessa modelagem, após parametrizados, são estimados a partir das observações GPS (SAPUCCI, 2001, p. 35). Os modelos matemáticos que tratam o atraso zenital troposférico são basicamente dois: o de Hopfield (SEEBER, 1993, p. 46) e o de Saastamoinen (SASTAMOINEN, 1973).

2.2.2.2.2 Refração Ionosférica

Definida de maneira bastante simplificada, a diferença entre a distância medida e a distância geométrica ρ , entre o satélite e o receptor, é chamada de refração ionosférica (particularmente para o caso em que se considera apenas a influência da ionosfera, desprezando-se todos os outros efeitos que interferem na propagação do sinal GPS), podendo ser considerada como um erro sistemático das observações.

A ionosfera abrange aproximadamente a região que vai de 50 a 1000 km acima da superfície terrestre. Como ela se comporta como um meio dispersivo, conseqüentemente, a refração ionosférica se torna dependente da frequência do sinal transmitido. O efeito de refração é proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Contents*), ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor.

Camargo (1999, p. 28) afirma que o problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço, em decorrência de diversas influências, tais

como: fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite.

Essas variações podem fazer com que o receptor perca a sintonia com o satélite, pelo enfraquecimento do sinal, caso específico do fenômeno denominado cintilação. Uma descrição mais detalhada dos vários fenômenos que causam mudanças nos valores do TEC é apresentada em Camargo (1999).

Vários modelos têm sido desenvolvidos para estimar a densidade de elétrons da ionosfera. No entanto, é difícil encontrar um que estime o TEC com precisão adequada aos levantamentos geodésicos de precisão (MONICO, 2000, p. 139). Por exemplo, o modelo de Klobuchar tem sido usualmente aplicado na correção de medidas GPS (KLOBUCHAR, 1986).

Os efeitos da refração ionosférica podem ser eliminados ou modelados. A dependência da refração ionosférica com relação à frequência do sinal torna possível eliminar os efeitos de primeira ordem, quando se dispõe de dados de dois sinais com frequências diferentes, os quais podem ser obtidos por usuários que dispõem de receptores GPS de dupla frequência. Nestes casos, podem ser utilizados alguns tipos de combinações de observáveis GPS, seja pseudodistância ou fase da onda portadora e, até mesmo ambas.

O uso de modelos da ionosfera pode melhorar os resultados. Nesses modelos, medidas de fase coletadas com receptores de dupla frequência são usadas para estimar as correções a serem utilizadas pelos usuários com receptores de frequência simples que operam na área. Maiores detalhes podem ser encontrados em Newby & Langley (1990), Georgiadou (1990), Newby & Langley (1992) e Klobuchar (1986).

Segundo Monico (2000, p. 144), esse método é ideal para ser usado dentro do contexto da RBMC, que dispõe de uma série de receptores GPS de dupla frequência coletando dados continuamente em diversas regiões do Brasil. Trabalhos assim já vêm sendo realizados e, num deles, estimou-se um modelo regional da ionosfera, o qual proporcionou resultados altamente promissores. Detalhes podem ser encontrados em Camargo (1999).

Juntamente com as mensagens de navegação dos satélites GPS, segue o modelo global da ionosfera, desenvolvido por Klobuchar (KLOBUCHAR, 1986). Além disso, o IGS vem disponibilizando um modelo global da ionosfera, o qual fornece valores do TEC, que estão num formato específico, denominado IONEX (IONosphere EXchange format) (SCHAER⁶ apud MONICO, 2000, 144).

Para aplicações em Geodinâmica, uma boa opção para eliminar os efeitos da refração ionosférica é a utilização de combinação linear apropriada, nos casos em que se dispõe de receptores de dupla frequência, podendo-se utilizar ambas as observáveis pseudodistância e fase da onda portadora. Assim, pode-se realizar uma combinação das portadoras L_1 e L_2 , obtendo-se a observável denominada combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (*Ionospheric Free Observable*), ou L_0 .

Considerando combinações lineares envolvidas entre observáveis coletadas numa mesma estação, uma combinação linear (CL_i) das portadoras ϕ_1 e ϕ_2 é dada por (MONICO, 2000, p. 167):

$$CL_i = m_1\phi_1 + m_2\phi_2, \quad (2.6)$$

onde, para a observável L_0 , $m_1 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)$ e $m_2 = -f_1f_2 / (f_1^2 - f_2^2)$, sendo f_1 e f_2 , respectivamente, as frequências das portadoras ϕ_1 e ϕ_2 .

Existem *softwares* apropriados para o processamento de dados GPS que podem utilizar esta observável para reduzir os efeitos de primeira ordem.

2.2.2.2.3 Outros Erros que Afetam a Propagação do Sinal

Além das refrações troposférica e ionosférica, há outros tipos de erro influenciando na propagação dos sinais GPS, tais como o multicaminho (*multipath*), perdas de ciclos e a própria rotação da Terra.

⁶ SCHAER, S. "Towards an IGS Combined Ionosphere Product". **IGS Annual Report**, p. 28-9, 1997.

Multicaminho é o fenômeno que ocorre quando o sinal transmitido pelo satélite chega à antena do receptor via dois ou mais caminhos. Em algumas circunstâncias, dependendo do ambiente físico da região (e vizinhanças) onde a antena se localiza, o receptor pode receber, além do sinal que chega diretamente à antena, sinais refletidos em superfícies vizinhas a ela, tais como construções, carros, árvores, massa d'água, cercas, etc. Além disso, podem ocorrer reflexões nos satélites, apesar de serem menos frequentes.

Logo, pode-se dizer que os sinais que chegam à antena do receptor podem percorrer caminhos diretos e indiretos. Conseqüentemente, tais sinais podem apresentar distorções na fase da onda portadora e na modulação sobre ela (portadora), afetando a qualidade do posicionamento.

Em geral, não há um modelo para tratar o efeito do multicaminho, pois as situações geométricas de cada local variam de forma um tanto arbitrária (MONICO, 2000, p. 145).

Segundo Chaves (2001, p. 36), várias técnicas de redução de multicaminho utilizam a geometria de propagação do sinal de um modo ou de outro. Essas técnicas incluem o uso de antenas especiais, tais como as *choke-ring*, processamento espacial com arranjo de várias antenas, auxiliado pela mudança de geometria da reflexão. As técnicas tentam reduzir a intensidade dos sinais secundários enquanto preservam o sinal direto. Weill (1997) faz uma detalhada descrição dessas técnicas.

Apesar do grande avanço que se tem obtido nas várias formas de atenuar o multicaminho, a recomendação mais efetiva é evitar levantamentos em locais propícios a essa ocorrência, bem como optar pelo uso de antenas capazes de reduzir o efeito (antena *choke-ring*). Uma antena *choke-ring* consiste de anéis condutores que são concêntricos com o eixo vertical da antena que, por sua vez, é fixado ao marco da estação. Mas, em uma grande quantidade de aplicações, o ambiente é propício ao multicaminho e a antena adequada ainda é muito pesada.

Trata-se, portanto, de um assunto que ainda merece muitas investigações (MONICO, 2000, p. 149).

No que diz respeito às perdas de ciclos, quando um receptor é ligado, a parte fracionária da fase de batimento da onda portadora, isto é, a diferença entre a portadora transmitida pelo satélite e a sua réplica gerada no receptor, é observada, e um contador de ciclos inteiros é inicializado. Durante o rastreamento, o contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase de batimento muda de 2π para 0. Assim sendo, numa determinada época, a fase observada é igual à soma da parte fracionária medida naquela época com o número inteiro de ciclos contados desde o início do rastreamento. O número de ciclos inteiros entre o satélite e o receptor é desconhecido no início do levantamento. Esse número de ciclos inteiros é denominado ambigüidade. Se não ocorrer interrupção da contagem no número inteiro de ciclos durante o período de observação, este permanece constante (HOFMANN-WELLENHOF et al, 1997).

Segundo Seeber (1993, p. 270), razões pelas quais podem ocorrer perdas de ciclos são, entre outras:

- Obstruções, em particular aquelas encontradas durante o movimento do receptor (*rover*), em tipos de posicionamento nos quais torna-se necessário deslocar o receptor;
- Ruído no sinal, causado, em particular, por multicaminho e cintilação ionosférica;
- Baixo ângulo de elevação do satélite, acarretando baixa potência do sinal, pelo fato de este precisar atravessar uma camada maior da atmosfera, sofrendo, portanto, atenuação atmosférica.

Monico (2000) menciona que tais razões não se restringem apenas ao bloqueio do sinal, devendo-se considerar também outros fatores, tais como: aceleração da antena do receptor, interferência de outras fontes de rádio e problemas com o receptor e o *software*.

Num ambiente com amplo campo de visão, as medidas de fase são, normalmente, contínuas com respeito ao período de uma sessão de observação. Porém, essa não é a realidade na maioria dos levantamentos GPS,

onde pode ocorrer obstrução do sinal de um ou mais satélites, impedindo que este chegue até a antena do receptor.

Deve-se esperar que, quando da interrupção do bloqueio do sinal, a parte fracionária da fase da portadora permaneça correta; somente o número inteiro de ciclos sofre mudança. Deve-se então corrigir a medida da fase da portadora do número inteiro de ciclos devido à descontinuidade na medida. Para tanto, torna-se necessário localizar onde se deu a ocorrência do salto (perda do sinal), bem como sua dimensão. Este processo denomina-se correção das perdas de ciclos (*cycle slip fixing*).

Finalmente, considerando-se que o cálculo das coordenadas dos satélites é realizado num sistema de coordenadas fixo à Terra, faz-se necessário corrigir o efeito causado pelo movimento de rotação da Terra, já que, durante a propagação do sinal do satélite ao receptor, o sistema de coordenadas terrestre rotaciona com relação aos satélites, alterando suas coordenadas. As coordenadas originais do satélite devem ser rotacionadas sobre o eixo Z de um ângulo α , definido como o produto do tempo de propagação pela velocidade de rotação da Terra. Tal ângulo deve ser dado em radianos, uma vez que o valor a ser multiplicado por ele está representado em unidades de distância.

2.2.2.3 Fontes de Erros no Receptor/Antena GPS

São os erros relacionados ao *hardware* do receptor e da antena. Referem-se ao erro do relógio do receptor e ao centro de fase da antena.

Cada receptor GPS possui sua própria escala de tempo, definida pelo seu oscilador interno, a qual difere da escala de tempo GPS. Os receptores GPS são normalmente equipados com osciladores de quartzo, que possuem boa estabilidade interna e são de custo relativamente baixo. Alguns receptores possuem osciladores altamente estáveis, podendo também aceitar padrões externos de tempo (MONICO, 2000, p. 151).

No entanto, dependendo da precisão requerida para determinado tipo de posicionamento, o erro do relógio do receptor não deve ser negligenciado, uma vez que a estabilidade do oscilador do receptor pode não ser compatível com

a precisão requerida; em outras palavras, se o posicionamento em questão exigir alta precisão, o padrão de oscilação do relógio do receptor é suficientemente instável, em relação à escala de tempo GPS, acarretando certamente uma degradação da precisão desejada para este tipo de posicionamento. Redes de alta precisão utilizam receptores com osciladores altamente estáveis, sendo equipamentos de custo bastante elevado. Maiores informações podem ser obtidas em Monico (2000) ou Leick (1995).

Quanto à antena, seu centro de fase eletrônico é o ponto no qual as medidas dos sinais são referenciadas e, geralmente, não coincide com o centro geométrico da antena. A discrepância varia com a intensidade e a direção do sinal incidente, sendo diferente para as portadoras L_1 e L_2 . Para levantamentos de alta precisão, todas as antenas envolvidas no projeto devem ser calibradas, visando corrigir as observações desse efeito. O centro mecânico (geométrico) de uma antena é usualmente definido com precisão submilimétrica. Os centros de fase eletrônicos para as portadoras L_1 e L_2 podem ser poucos milímetros afastados do centro mecânico. Para a maioria dos tipos de antena, as coordenadas relacionadas a estes afastamentos são geralmente fornecidas pelo próprio fabricante da antena (SEEBER, 1993, p. 310).

O procedimento utilizado para determinar o centro de fase da antena deve ser cuidadosamente estudado, se diferentes tipos de antena estão envolvidos num mesmo projeto. A determinação da localização e variação do centro de fase da antena é, por vezes, de difícil obtenção, de forma que os resultados não são muito confiáveis.

Atualmente, as correções utilizadas pela comunidade geodésica são aquelas adotadas como padrão pelo IGS, em que quase todas as antenas em uso para fins geodésicos são calibradas com respeito à antena Dorne Margolin (De JONGE, 1998). Maiores informações podem ser obtidas em Monico (2000). Para os casos que exigem a mais alta acurácia possível, pode ser conveniente utilizar apenas combinações receptor/antena idênticas (SEEBER, 1993, p. 311), muito embora tal condição não se viabilize.

2.2.2.4 Fontes de Erros na Estação GPS

Variações resultantes de fenômenos geofísicos, ocorridos durante o período de coleta das observações, podem afetar as coordenadas das estações envolvidas no levantamento. Entre as possíveis correções que devem ser aplicadas, pode-se citar: correção ao movimento do pólo, à carga da atmosfera, às marés terrestres e à carga dos oceanos. No presente trabalho, enfatiza-se apenas os três últimos casos. Importante frisar que, no posicionamento relativo, um erro nas coordenadas da estação de origem afetará as das demais.

2.2.2.4.1 Marés Terrestres (*Earth Body Tides*)

Há pelo menos uma década, o interesse do geodesta, no que concerne ao fenômeno das marés terrestres, se restringia à chamada *correção gravimétrica*, também utilizada pelo geofísico e pelo geólogo em seus levantamentos gravimétricos e, às vezes, até negligenciada. Mas, em Geodésia, como ocorre em muitas outras ciências, a tecnologia da era espacial proporcionou avanços jamais sonhados (GEMAEL, 1986, p. 85).

Marés terrestres são fenômenos deformacionais gerados por forças essencialmente gravitacionais sobre a Terra, sendo exercidas, principalmente, pela Lua e pelo Sol.

Para complicar o problema, sabe-se hoje que a componente vertical da força de maré, registrada gráfica ou digitalmente numa estação de marés terrestres, é perturbada pelas marés oceânicas. O grau dessa perturbação dependerá de vários fatores, tais como a distância da estação considerada ao oceano, a espessura da litosfera, suas características reológicas⁷, etc (GEMAEL, 1986, p. 85).

Em regiões próximas ao Equador, a superfície terrestre desloca-se por volta de 40 cm durante um período de 6 horas (BAKER⁸ apud MONICO, 2000, p. 155). A variação é função da posição do Sol e da Lua; os períodos

⁷ *Reologia* é a parte da física que investiga as propriedades e o comportamento mecânico de corpos deformáveis que não são nem sólidos nem líquidos.

⁸ BAKER, T. F. “*Tidal Deformation of the Earth*”. **Sci. Prog.**, Oxf., v. 69, p. 197-233, 1984;

principais dessas variações são de 12 h (semi-diurna) e de 24 h (diurna). Tal variação é função do tempo, mas também depende da posição (em especial, a latitude) da estação. A deformação permanente da Terra pode ser expressa, em metros, em virtude do gradiente médio da atração luni-solar, como uma função aproximada da latitude geodésica:

$$\begin{aligned}\Delta W &= -0,12083 \left(\frac{3}{2} (\sin^2 \varphi) - \frac{1}{2} \right), \\ \Delta U &= -0,05071 \cos \varphi \sin \varphi\end{aligned}\tag{2.7}$$

para as componentes vertical e norte, respectivamente (BOCK, 1998, p. 24). Além de ser uma função que depende somente da latitude, a componente permanente de deformação é considerada uma função zonal, de modo que suas linhas nodais são os paralelos de mais ou menos $36^\circ 16'$. O efeito desta componente permanente é aumentar quase desprezivelmente o achatamento da Terra (ODISHAW, 1964, p. 165).

Apesar de estarem sendo mencionadas como fonte de erro na estação, convém notar que as marés terrestres (bem como cargas dos oceanos) alteram, segundo Seeber (1993, p. 89), o potencial gravitacional da Terra e, conseqüentemente, causam uma aceleração adicional aos satélites GPS; em outras palavras, alteram a órbita dos satélites. Entretanto, tal aceleração é relativamente pequena, da ordem de 10^{-9} m/s^2 . Para satélites que orbitam a menores altitudes, as influências podem ser muito maiores.

Os deslocamentos terrestres causados por forças de maré que, por sua vez, são representadas por harmônicos esféricos de grau n e ordem m , são caracterizados pelos números de *Love* (h_{nm} e k_{nm}) e *Shida* (l_{nm}). Estes números referem-se a forças distribuídas na Terra, cujos efeitos são integrados em todo o seu volume (caso do fenômeno de maré terrestre). Existem, no entanto, efeitos que representam carregamentos específicos (caso do efeito das marés oceânicas, pressão atmosférica, carregamentos glaciais, etc.) em diferentes estratos da Terra, os quais produzem também alterações no potencial e redistribuição de massas e que podem estar associados a processos reológicos elásticos ou inelásticos com diferentes condições de contorno. A estes efeitos podem estar associados

diferentes números de *Love*, dentro de um formalismo generalizado. O termo h_{nm} se relaciona ao deslocamento radial e k_{nm} à variação do potencial em função do potencial de maré, enquanto o termo l_{nm} está associado ao deslocamento tangencial. Os valores efetivos destes números dependem da latitude da estação e da frequência da maré (WAHR, 1981). Essa dependência é uma consequência da elipticidade e da rotação da Terra, e inclui uma forte dependência com a frequência relacionada à banda de variação diurna.

As correções para o deslocamento das estações são realizadas por um procedimento que envolve basicamente duas etapas. Os cálculos efetuados na primeira etapa utilizam uma expressão para o potencial de maré de grau 2. São também utilizados valores nominais para os números de *Love* e *Shida* para todos os constituintes envolvidos no potencial e em todas as estações.

Assim, uma das correções efetuadas nesta primeira etapa, em virtude das forças de maré de grau 2 (a maior parte), pode ser dada pela expressão:

$$d = \frac{GM_{MS}}{GM_E} \frac{r^4}{R^3} \left\{ 3l_2 (\hat{r} * \hat{R}) \hat{R} + \left[3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right) (\hat{r} * \hat{R})^2 - \frac{l_2}{2} \right] r \right\}, \quad (2.8)$$

onde

- d é um vetor tridimensional de correção às coordenadas;
- GM_{MS} é o parâmetro gravitacional para a Lua ou o Sol;
- GM_E é o parâmetro gravitacional para a Terra;
- $\hat{R}$ e R são o vetor unitário do geocentro à Lua ou ao Sol e a magnitude do mesmo, respectivamente;
- $\hat{r}$ e r são o vetor unitário do geocentro à estação e a magnitude do mesmo, respectivamente;
- h_2 é o valor nominal do número de *Love* de grau 2;
- l_2 é o valor nominal do número de *Shida* de grau 2.

A parte proporcional a h_2 fornece a componente radial do deslocamento da estação, em virtude da maré induzida. Os termos em l_2 representam o vetor deslocamento transversal à direção radial.

Suponha que a correção esteja sendo aplicada a uma única estação. Inicialmente, calcula-se a distância r da estação ao centro de massa da Terra (origem do referencial), em termos das componentes cartesianas:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} . \quad (2.9)$$

Em seguida, são determinados os produtos $(\hat{r} * \hat{R})$ dos vetores unitários, em relação ao Sol e à Lua, denotados por:

$$(\hat{r} * \hat{R})_S = [(X_S * X_{st}) + (Y_S * Y_{st}) + (Z_S * Z_{st})] / (r * R_S) , \quad (2.10)$$

$$(\hat{r} * \hat{R})_M = [(X_M * X_{st}) + (Y_M * Y_{st}) + (Z_M * Z_{st})] / (r * R_M) , \quad (2.11)$$

onde (X_{st}, Y_{st}, Z_{st}) , (X_S, Y_S, Z_S) e (X_M, Y_M, Z_M) são, respectivamente, as posições da estação, do Sol e da Lua. R_S e R_M são, respectivamente, as distâncias do Sol e da Lua ao geocentro.

Assim, podem ser computadas as correções às coordenadas cartesianas:

$$\begin{aligned} CorrX &= corr_S \cdot X_S + corr_M \cdot X_M + corr_{MS} \cdot X_{st} \\ CorrY &= corr_S \cdot Y_S + corr_M \cdot Y_M + corr_{MS} \cdot Y_{st} , \\ CorrZ &= corr_S \cdot Z_S + corr_M \cdot Z_M + corr_{MS} \cdot Z_{st} \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde

$$\begin{aligned}
corr_S &= \frac{\frac{GM_S r^4}{GM R_S^3} [0,2556d_0(\hat{r} * \hat{R})_S]}{R_S} \\
corr_M &= \frac{\frac{GM_M r^4}{GM R_M^3} [0,2556d_0(\hat{r} * \hat{R})_M]}{R_M} \\
corr_{MS} &= \frac{\frac{GM_S r^4}{GM R_S^3} [0,6579d_0(\hat{r} * \hat{R})_S^2 - 0,3045d_0]}{r} + \frac{\frac{GM_M r^4}{GM R_M^3} [0,6579d_0(\hat{r} * \hat{R})_M^2 - 0,3045d_0]}{r}
\end{aligned} \quad , (2.13)$$

sendo os valores $0,2556d_0$, $0,6579d_0$ e $0,3045d_0$ calculados em função dos números de *Love* (h_2) e *Shida* (l_2).

Dos resultados obtidos, deve-se ainda subtrair a correção à deformação permanente da Terra. Para tanto, convertem-se as coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para geodésicas (φ, λ, h). Então, subtrai-se o deslocamento radial em virtude da deformação permanente da Terra, bem como a correção em virtude da deformação permanente da componente Norte.

Finalmente, convertem-se as correções em termos de (φ, λ, h) para deslocamentos em (X, Y, Z), subtraindo estes últimos das coordenadas cartesianas da estação.

Agora sim, pode ser efetivamente calculado o vetor deslocamento d , expresso pela equação (2.8).

As correções efetuadas na segunda etapa se devem basicamente à dependência da frequência que os números de *Love* e *Shida* possuem, devendo ser adicionadas àquelas realizadas na primeira etapa. Trata-se de uma correção dH na componente vertical das coordenadas da estação.

Maiores informações e detalhes do algoritmo padrão a ser utilizado com GPS podem ser encontrados no *IERS (International Earth Rotation Service) Standards* (McCARTHY, 1996).

2.2.2.4.2 Carga dos Oceanos (*Ocean Loading*)

O efeito da carga dos oceanos pode ser considerado como uma resposta elástica da crosta terrestre às marés oceânicas. Conseqüentemente, há um

deslocamento da superfície terrestre, cuja magnitude depende das características da crosta e das posições do Sol, da Lua e da estação, podendo alcançar cerca de 10 cm na componente vertical em alguma parte do globo. Em regiões afastadas da costa, este valor decresce, mas ainda pode alcançar cerca de 1 cm para uma distância oceano-estação da ordem de 1000 km (BAKER⁹ et al. apud MONICO, 2000, p. 156). Tal efeito deve ser considerado quando se objetiva levantamento de precisão.

O efeito da carga dos oceanos pode ser incorporado por variações periódicas em termos de coeficientes de Stokes $\bar{C}_{nm}$ e $\bar{S}_{nm}$. Estes coeficientes são definidos na expansão do potencial gravitacional V na superfície da Terra, em termos das coordenadas esféricas (r, λ, φ) , como:

$$V(r, \lambda, \varphi) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right], \quad (2.14)$$

onde a é o raio equatorial da Terra, G é a constante de gravitação, M é a massa da Terra e P_{nm} são as funções completas normalizadas de *Legendre* (Wünsch et al., 2001).

Essa carga induz variações nas componentes de rotação da Terra, em três bandas de frequência: semi-diurna, diurna e de longo período. Detalhes do algoritmo padrão a ser utilizado com GPS podem ser encontrados no *IERS Standards* (McCARTHY, 1996).

2.2.2.4.3 Carga da Atmosfera

O efeito da carga atmosférica pode ser considerado como uma resposta elástica da crosta terrestre a uma massa atmosférica distribuída sobre a superfície terrestre e variante no tempo. Segundo Monico (2000, p. 156), variações dessa distribuição podem ser inferidas a partir da medida de pressão da atmosfera, a qual, por sua vez, induz deformações sobre a crosta, principalmente

⁹ BAKER, T. F., CURTIS, D. J., DODSON, A. H. "Ocean Tide Loading and GPS". **GPS World**, p. 54-9, March, 1995.

na direção vertical. Recentes estudos têm demonstrado que tal efeito pode atingir uma magnitude de alguns milímetros na direção vertical (BOCK, 1996, p. 25). As maiores deformações estão associadas a tempestades (*synoptic storms*) na atmosfera, podendo alcançar 10 mm (VAN DAM & WAHR, 1987). A maioria dos programas para processamento de dados GPS ainda não apresenta modelos para correções dessa natureza.

Para redes de grande dimensão, requerendo alta acurácia, recomenda-se estender a campanha para duas semanas, em vez dos usuais três a cinco dias (BLEWITT¹⁰ et al. apud MONICO, 2000, p. 157).

2.2.3 GPS e Geodinâmica

Há poucos anos atrás (talvez, menos de uma década), acreditava-se que o GPS dificilmente, ou até mesmo nunca, desempenharia função importante na Geodinâmica. Entretanto, este ponto de vista começou a mudar consideravelmente, levando-se em conta o sucesso obtido pelo IGS, ao disponibilizar serviços essenciais à Geodésia, além de produtos de altíssima precisão.

2.2.3.1 Monitoramento de Movimentos Crustais

As deformações da crosta terrestre ocorrem ao longo do tempo geológico. As rochas respondem às forças que nelas atuam, sendo modificadas pela geração de algumas estruturas, tais como dobramentos e falhas, devendo-se considerar também processos de formação de montanhas, vulcanismo e, de forma mais abrangente, o espalhamento do soalho oceânico.

Tais deformações são decorrentes de várias forças. Alguns cientistas defendem a teoria de que correntes termais no manto seriam responsáveis pelo movimento dos continentes, pela erosão de raízes de montanhas e pela geração de algumas depressões e protuberâncias na crosta. Outros

¹⁰ BLEWITT, G., VAN DAM, T., HEFLIN, M. B. “*Atmospheric Loading Effects and GPS Time-Averaged Vertical Positions*”. In: **International Symposium on Deformation in Turkey** (1). Istanbul, Turkey. Proceedings..., 1994.

defendem que ciclos orogênicos (fenômenos que levam à formação de montanhas ou cadeias montanhosas, relacionados principalmente a colisões interplacas) são controlados pelo movimento das placas litosféricas. Atualmente, esta segunda hipótese é geralmente aceita. Entretanto, as forças responsáveis pelo movimento das placas seriam, por sua vez, geradas pela convecção termal no manto. Essa forte integração de fenômenos é, atualmente, objeto de intensa pesquisa por parte de geólogos e geofísicos. Vale citar também a influência de sismos gerados a partir de fenômenos como acomodamento de grandes massas terrestres (subsidência) e conseqüente liberação de energia.

Sabe-se, da Geofísica, que a estrutura física da Terra possui três divisões principais: crosta, manto e núcleo. Com relação à sua estrutura dinâmica, com conseqüências para a superfície física, pode ser dividida em: litosfera, astenosfera e mesosfera. Quando estes dois tipos de divisão são analisados ao mesmo tempo, pode-se obter algumas relações entre ambos. Desta forma, atualmente se sabe que a litosfera ocupa todo o volume da crosta e parte do manto superior; não de forma totalmente regular, quanto à profundidade que pode atingir, mas com algumas irregularidades na sua espessura ao longo de toda a sua extensão em torno da Terra.

Conseqüentemente, movimentos crustais não podem ser analisados como um episódio isolado, mas como fenômenos decorrentes da complexa interação das forças existentes nos diversos níveis de profundidade da Terra, além da interação desta com fenômenos externos à mesma.

Nos últimos anos, técnicas como GPS, VLBI e SLR têm sido usadas com o propósito de monitorar alguns tipos de movimentos crustais, tais como movimentos de falhas sismicamente ativas, em campanhas como o *Key Stone Project*, do Japão ((TAKAHASHI & ICHIKAWA)¹¹ apud GE et al., 2000).

Segundo Seeber (1993, p. 335), até então, movimentos crustais eram analisados principalmente por meio destas duas últimas técnicas (VLBI e

¹¹ TAKAHASHI, Y. & R. ICHIKAWA, 1999. "Comparison between Station Movements Measured by VLBI and Those Measured by GPS". **Journal of the Communications Research Laboratory**. 46 (1), 171-176.

SLR) apenas. Com o VLBI, linhas de base de longas distâncias podem ser determinadas com precisão de poucos centímetros para alguns milhares de quilômetros. No entanto, esta técnica apresenta algumas desvantagens, que são o enorme custo que a técnica envolve e sua limitação em virtude do número relativamente pequeno de estações fundamentais. Para muitas áreas de interesse, em particular se um grande número de pontos deveria ser determinado em um espaço não muito grande, o GPS já oferecia consideráveis vantagens, em virtude de sua portabilidade e ao número relativamente grande de estações fundamentais que podiam ser estabelecidas, bem como pelo custo relativamente baixo, se comparado com aquele envolvido no VLBI.

2.2.3.1.1 Contribuição da Tecnologia GPS

Conforme mencionado no primeiro capítulo, a contribuição do GPS nos estudos de Geodinâmica, juntamente com as técnicas VLBI e SLR, tornou-se efetiva a partir da operacionalização da rede mundial de estações IGS, em 1994. A rede IGS é, atualmente, composta por mais de 400 estações em todo o mundo, dentre as quais, algumas estando localizadas em território nacional. A consequência de apenas algumas estações da RBMC fazerem parte da rede IGS deve-se ao fato de existirem problemas de comunicação nas demais.

Atualmente, vários trabalhos têm sido realizados no intuito de monitorar continuamente a variação das coordenadas de estações localizadas em diversas redes geodésicas.

Resultados da solução geodésica estimada por Costa (1999, p. 137) indicam valores de cerca de 2 cm ao ano, em média, para as velocidades das estações da RBMC, com todas apresentando uma certa tendência de movimento a noroeste. Nesse mesmo trabalho, concluiu-se que a estimativa do campo de velocidades, utilizando técnicas espaciais geodésicas, depende do período de tempo e do espaçamento das observações dentro desse período. O IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (1997) sugere que se trabalhe com um período mínimo de 5 anos.

Os principais campos de aplicação do GPS para monitoramento de movimentos crustais podem ser identificados como (SEEBER, 1993, p. 336):

- a) Análise de movimento e deformação de placas, a níveis continental e global;
- b) Análise de movimento crustal regional; e
- c) Monitoramento local de deformação e áreas de subsidência.

Para projetos do grupo a), comparações entre resultados de GPS e VLBI, envolvendo distâncias maiores que 2000 km, apresentam concordância ao nível de 1σ (desvio padrão), provando conseqüentemente, em princípio, a capacidade de aplicação da técnica GPS no âmbito global da Geodinâmica (LARSON¹² et al., BLEWITT¹³ apud SEEBER, 1993, p. 336). A acurácia estimada é de aproximadamente 1 cm para um dia de coleta de dados, e de 1 mm para três meses de observação (SEEBER, 1993, p. 336). É, inclusive, neste contexto que o IGS melhor se enquadra, por se tratar de uma aplicação de caráter global, situação na qual é possível analisar a taxa de movimentação anual das placas litosféricas, bem como a variação do comprimento de longas linhas de base, com alta precisão.

Os projetos do grupo b), por sua vez, também já apresentam significativos resultados. Investigações e medições têm sido efetuadas em praticamente todas as regiões do mundo que apresentam atividades sísmicas relevantes. Exemplos bem conhecidos são, dentre outros:

- As bem conhecidas redes de controle da Califórnia (SEEBER, 1993, p. 336). Atualmente, existe a *Southern California Integrated GPS Network* (SCIGN), podendo ser considerada uma rede no âmbito regional. A SCIGN é um projeto que objetiva instalar 250 estações GPS permanentes na região da Bacia de Los Angeles, no intuito de proporcionar, continuamente, informações de alta acurácia

¹² LARSON, K., WEBB, F., AGNEW, D. “*Application of the Global Positioning System to Crustal Deformation Measurement*”. **JGR** **96**, 10, 16, 547-16,548, 1991.

¹³ BLEWITT, G. “*Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied in Geodetic Baselines up to 2000 km*”. **JGR**, v. 94, 10.187-10.203, 1989.

sobre as deformações da região e com isso melhorar a predição de ocorrência de terremotos. Recentes estimativas (abril de 2002) de velocidade de muitas de suas estações têm produzido resultados com precisão de aproximadamente 0,5 mm/ano (SCIGN, 2001);

- O projeto CASA (*Central and South America*) GPS. No caso da América do Sul, a importância do projeto estaria relacionada basicamente com a determinação do campo de velocidades da Placa Sul-americana, uma vez que a atividade sísmica nesta região é relativamente baixa, pelo menos na maior parte do interior da placa. O mesmo já não se poderia afirmar com relação às regiões de bordas da placa, como por exemplo, na região de colisão entre as Placas Sul-Americana e a de Nazca, onde a atividade sísmica é mais acentuada. Atualmente, o objetivo do projeto CASA é monitorar as recentes deformações ao longo da Falha de Boconó, na Venezuela. Com a atual configuração da rede composta pelas estações que integram este projeto, é possível modelar não somente os movimentos relativos ao longo dessa falha, mas também os movimentos no contexto global do modelo de placas;
- A região do Mediterrâneo, amplamente reconhecida por ser uma zona de colisão entre as placas da Eurásia, da Arábia e da África. Nesta região, são feitas análises sobre indicadores geológicos e de tensões sismológicas, sendo que o crescente número de estações GPS permanentes nela instaladas vem contribuindo de forma cada vez mais importante com a

análise de movimento de placas (McCLUSKY¹⁴ et al. apud VITI et al., 2001);

- Zonas de falhas neovulcânicas na Islândia que, segundo Du & Foulger (2001), é um complexo geológico contendo diversos elementos tectônicos contrastantes.

Em áreas de grande risco (com terremotos e intensa atividade vulcânica), como a Falha de San Andreas, na Califórnia, ou a região do Kanto-Tokay, no Japão, têm sido instalados diversos arranjos de receptores GPS para o monitoramento contínuo de tais regiões (BOCK¹⁵ apud SEEBER, 1993, p. 337). A primeira proposta de usar receptores GPS como sismômetros foi feita em 1994, sendo que recentes experimentos sobre este conceito, com a utilização de sistemas GPS para RTK (*Real-Time Kinematic*), têm demonstrado resultados bastante encorajadores [GE et al., 2000]. Atualmente, no Japão, foi estabelecida sob o nome GEONET (*GPS Earth Observation NETwork*), uma rede para monitoramento de deformações da crosta, no intuito de detectar sismos locais, possuindo quase 1000 estações GPS (<http://mekira.gsi-mc.go.jp/ENGLISH/index.html>, acessado em 01/12/2001). Trata-se de uma rede inovadora, uma vez que busca utilizar posicionamento de alta precisão de uma forma que, em princípio, se tornaria inviável, haja vista que esta rede necessita de posicionamento em tempo real. É provável, portanto, que utilize algum tipo de posicionamento de alta precisão, juntamente com as efemérides IGU (Ultra-rápidas), preditas pelo IGS, as quais, por sua vez, são mais precisas que as transmitidas. De fato, adotando essa metodologia, a grande dificuldade que a GEONET enfrenta é a de ter que processar dados de um enorme número de estações em tempo real.

Outro projeto que merece destaque é o caso das regiões da Antártida e da Groenlândia, onde foram instalados diversos gravímetros e receptores GPS, uma vez que, nestas regiões, a deformação crustal é fortemente

¹⁴ McCLUSKY, S. et al., 2000. "Global Positioning System Constraints on Plate Kinematics and Dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus". **J. Geophys. Res.**, 105, 5695-5719.

¹⁵ BOCK, Y. "Continuous Monitoring of Crustal Deformation". **GPS World** 2 (6), 40-47, 1991.

influenciada por redelimitação pós-glacial e acumulação e redistribuição contemporâneas de grandes massas geladas (LARSON & VAN DAM¹⁶ apud FANG & HAGER, 2001). Recentemente, Wahr et al.¹⁷, citados por Fang & Hager (2001), descobriram, através de experimentos numéricos sobre modelos de viscosidade entre duas camadas terrestres, que os efeitos de relaxação viscosa, devidos à redelimitação pós-glacial, podem ser consideravelmente reduzidos quando se subtrai a variação causada por distúrbios da gravidade, multiplicada por uma constante empírica A , da variação de deslocamento vertical, esta por sua vez observada principalmente com GPS.

De acordo com as equações fundamentais da teoria do potencial, o potencial de gravidade pode ser escrito como (TORGE, 2001, p. 56):

$$W = V + Z, \quad (2.15)$$

onde V é o potencial gravitacional e Z é o potencial centrífugo. Com respeito ao movimento orbital dos satélites, somente o potencial gravitacional V é de interesse. Embora não seja dada muita ênfase a este assunto, neste trabalho, pode-se dizer que o potencial gravitacional V é subdividido em uma parte principal V_i (esferopotencial), que pode ser matematicamente descrita, e uma parte remanescente T , denominada distúrbio potencial. Esta componente remanescente do potencial gravitacional é o distúrbio de gravidade citado no último exemplo.

Vários outros casos de aplicação do GPS no estudo de deformações em escala regional, tanto exclusivamente quanto paralelamente a outras técnicas geofísicas e geológicas, estão disponíveis em vários e recentes artigos sobre Geodinâmica. Desta forma, torna-se inviável citar tantos casos num trabalho como este, haja vista a necessidade de um embasamento sobre outros aspectos não menos importantes do trabalho.

¹⁶ LARSON, K. M. & VAN DAM, T., 2000. "Measuring Postglacial Rebound with GPS and Absolute Gravity". **Geophys. Res. Lett.**, 27, 3925-3928.

¹⁷ WAHR, J. M., HAN, D. & TRUPIN, A., 1995. "Prediction of Vertical Uplift Caused by Changing Polar Ice Volume on a Viscoelastic Earth". **Geophys. Res. Lett.**, 22, 977-980.

Finalmente, projetos do grupo c), aqueles cujas aplicações são feitas em nível local, na maioria dos casos pertencem ao campo de análise de deformações, em pesquisas de engenharia, possibilitando o monitoramento de:

- subsidência de solos, em geral existentes em áreas de minas e reservatórios de óleo subterrâneo;
- estruturas deslizantes, tais como em possíveis encostas de estradas; e
- estruturas geotectônicas locais.

Nestes casos, em geral, as distâncias envolvidas são muito pequenas (aproximadamente 1 km); conseqüentemente, pode-se alcançar uma acurácia de poucos milímetros nos resultados, sendo possível detectar deformações razoavelmente pequenas.

2.2.3.1.2 Marés Terrestres e Marés Oceânicas

Trata-se de variações resultantes de fenômenos geofísicos, em geral gravitacionais, envolvendo a Terra, o Sol e a Lua, ocorridos durante o período de coleta das observações, podendo afetar as coordenadas das estações envolvidas no levantamento (MONICO, 2000, p. 154).

A carga que a Terra sofre, decorrente dos efeitos de marés terrestres e oceânicas, produz diversos tipos de sinais que podem ser medidos por meio de técnicas geodésicas. Agnew (1996), no intuito de detectar sinais causados pelos efeitos de marés oceânicas, com maior acurácia, decidiu utilizar uma combinação de modelos locais e globais de marés oceânicas. Para tanto, utilizou o programa NLOADF, que calcula todas as quantidades de interesse (valores de gravidade, deslocamentos, inclinações e deformações) e inclui o caso onde as medidas são feitas sob a superfície do oceano (<http://www.agu.org/pubs/abs/jb/96JB03458/96JB03458.html>, acessado em 14/12/2001).

2.2.3.2 Monitoramento do Movimento do Pólo e da Rotação da Terra

O GPS possui outras aplicações em Geodinâmica, tais como no monitoramento da orientação da Terra, em particular as variações do movimento do pólo e do UT1, que é o UT0 corrigido da influência do movimento do pólo sobre a longitude (onde UT0 é o TU (Tempo Universal) obtido diretamente das observações astronômicas, e este, por sua vez, está sujeito à ação do movimento do pólo e influências sazonais da velocidade de rotação da Terra). Monico (2000) apresenta uma descrição mais detalhada sobre sistemas de tempo. Uma noção básica sobre sistemas de referência é de fundamental importância neste tipo de monitoramento. Entretanto, a abordagem do assunto desta seção é suficientemente simples, não chegando a comprometer a compreensão do mesmo, caso um leitor que não tenha profundo conhecimento sobre sistemas de referência venha a utilizar o presente trabalho.

As posições do Sol e da Lua se alteram em relação à Terra, e os gradientes de suas forças gravitacionais, as forças de maré, alteram a superfície terrestre (BOCK, 1998, p. 12). Estas forças podem ser preditas com alta acurácia, uma vez que as órbitas e massas desses corpos são bem conhecidas.

O eixo de rotação da Terra e seu plano equatorial não estão fixos no espaço, mas rotacionam em relação a um sistema inercial, tal como o CCRS (*Conventional Celestial Reference System* – Sistema de Referência Celeste Convencional) (MONICO, 2000, p. 63). A seção (3.1) descreve detalhadamente o CCRS e seu correspondente terrestre, o CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System*).

O principal movimento do eixo de rotação terrestre no espaço inercial é seu movimento de precessão, devido à atração luni-solar sobre o bojo equatorial da Terra. Além disso, há outros pequenos movimentos do eixo de rotação, que recebem o nome de nutação. Finalmente, o movimento do eixo de rotação da Terra com respeito à crosta terrestre (no sistema de referência terrestre) é denominado movimento do pólo.

Segundo Bock (1998, p. 12), a nutação e o movimento polar são fenômenos decorrentes de torques externos (movimento forçado) e do chamado

movimento livre. A nutação representa principalmente a resposta forçada da Terra, enquanto o movimento polar representa as respostas livre e forçada em partes aproximadamente iguais. Atualmente, somente a resposta forçada da nutação pode ser bem predita a partir de modelos orbitais e geofísicos disponíveis, auxiliados por medidas geodésicas espaciais como VLBI. A resposta livre que compõe a nutação e o movimento polar pode ser determinada somente através das técnicas de Geodésia Espacial, tais como VLBI e, de forma cada vez mais intensa, o GPS.

Durante um longo período, os parâmetros de orientação da Terra eram determinados apenas por meio de observações astronômicas, dentro do contexto de um serviço internacional. Até que, no dia primeiro de janeiro de 1988, o IERS passou a realizar essa função. Atualmente, as tecnologias utilizadas nessa atividade são o VLBI, SLR, LLR (*Lunar Laser Ranging*), GPS, entre outras. Desta forma, os parâmetros de orientação da Terra devem ser obtidos, sendo denominados ERP (*Earth Rotation Parameters* – Parâmetros de Rotação da Terra) ou EOP (*Earth Orientation Parameters* – Parâmetros de Orientação da Terra). Estes parâmetros são:

- O Tempo Sideral Verdadeiro de Greenwich (GST); e
- As coordenadas do pólo (x_p, y_p).

Para as coordenadas do pólo, se elas não são estimadas a partir das próprias observações, os valores publicados pelo IERS devem ser usados (BOCK, 1998, p. 16; MONICO, 2000, p. 66). Os valores de x_p e y_p são fornecidos pelo Boletim A, produzido pelo IERS (IERS, 2001).

Um exemplo da utilização de dados GPS (inclusive de VLBI, SLR e LLR) em estudos do movimento do pólo pode ser encontrado num trabalho realizado por Stieglitz & Dickman (1999), onde são explorados registros estatisticamente significantes da correlação entre variações do momento angular atmosférico e o movimento polar, em escalas temporais que variam de dias a meses. Desenvolveram-se experimentos nos quais foi possível verificar que a correlação entre as excitações atmosférica (vento atmosférico e pressão) e geodésica (“rápido” movimento polar) é estatisticamente diferente de zero, a um

nível de confiança de 99,7%. Dados de movimento polar, coletados através das técnicas geodésicas citadas anteriormente, revelam características (feições) de rápido movimento polar, com períodos que variam de poucos dias a várias semanas. Esse conjunto de dados de movimento polar, cuja denominação é SPACE96, foi obtido através do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Foram utilizados dados cujo intervalo de tempo está compreendido entre 28 de setembro de 1976 e 8 de fevereiro de 1997, onde cada valor diário corresponde à combinação de medidas de orientação da Terra obtidas através das técnicas espaciais geodésicas citadas anteriormente.

Além do trabalho relatado neste exemplo, muitos outros trabalhos relativos a este tema têm sido desenvolvidos, utilizando as redes geodésicas estabelecidas, em princípio, com o propósito de monitoramento de movimentos crustais, as quais passaram a ser utilizadas também para o monitoramento da rotação e orientação (movimento do pólo) da Terra, bem como para previsão de sismos.

3 REFERENCIAIS E POSICIONAMENTO COM GPS

Em qualquer atividade de posicionamento geodésico, enfocando neste texto apenas os de natureza espacial, e em especial o GPS, é de fundamental importância que a definição e a realização dos sistemas de referência (terrestre e celeste) sejam apropriadas, precisas e consistentes (BOCK, 1998, p. 1). Tanto a definição como a realização são imprescindíveis para modelar as observáveis, descrever as órbitas dos satélites, representar, interpretar e, quando necessário, transformar os resultados.

Segundo Monico (2000, p. 60), quando um referencial é definido e adotado por convenção, a etapa seguinte é caracterizada pela coleta de observações a partir de pontos sobre a superfície terrestre (rede), devidamente materializados. Fazem parte, ainda, o processamento e análise, bem como a divulgação dos resultados, que é, essencialmente, um conjunto de coordenadas associado a uma época particular. As coordenadas podem vir acompanhadas de suas respectivas velocidades. Esse conjunto materializa o sistema de referência.

Uma vez realizada a materialização do referencial, um outro aspecto muito importante diz respeito à sua densificação, procedimento que, em geral, visa reduzir o espaçamento entre estações (OLIVEIRA, 1998, p. 23).

Em resumo, a definição de um sistema de referência diz respeito a um caso ideal, ficando limitada em razão dos erros inerentes às observáveis utilizadas na sua realização e da imprecisão das constantes adotadas por convenção. A realização nada mais é que uma lista de coordenadas e velocidades dos objetos que materializam o sistema, que pode ser denominada conjunto de coordenadas de referência.

A acurácia das coordenadas de referência deve ser compatível com a da tecnologia de posicionamento adotada; caso contrário, a qualidade dos resultados se deteriora.

No posicionamento por satélites, os sistemas de referência adotados são, em geral, globais e geocêntricos, haja vista que o movimento dos satélites ocorre ao redor do centro de massa da Terra. As estações terrestres são, normalmente, representadas num sistema fixo à Terra, que rotaciona com ela. O

movimento do satélite é mais bem descrito no sistema de coordenadas equatoriais. Como ambos os sistemas são geocêntricos, têm-se referenciais “quase-inerciais” (MONICO, 2000, p. 60). Dessa forma, as leis da relatividade geral deveriam ser levadas em consideração. No entanto, Hofmann-Wellenhof et al., citados por Monico (2000, p. 61), afirmam o seguinte: “Mas, desde que o efeito relativista principal é causado pelo próprio campo gravitacional da Terra, um sistema geocêntrico é o mais adequado para a descrição do movimento de satélites próximo à Terra. Note que os eixos de um sistema de coordenadas geocêntrico permanecem paralelos no movimento da Terra ao redor do Sol, pois o mesmo é descrito pela translação, sem considerar a rotação”.

Segundo Monico (2000, p. 61), definidos os dois referenciais, tem-se ainda que conhecer a relação entre eles, para poder modelar adequadamente as observáveis. No ajustamento, é essencial que posições dos satélites e estações terrestres sejam representadas no mesmo sistema de referência.

3.1 Sistemas de Referência Celeste e Terrestre Convencionais

Os sistemas de coordenadas envolvidos no posicionamento por satélite são o celeste e o terrestre convencionais, os quais são geocêntricos. O eixo X tem orientação fixa no plano fundamental, e o eixo Z, normal a esse plano, pode acompanhar, ou não, o movimento de rotação da Terra. O eixo Y é definido de forma que atenda à definição de um sistema dextrógiro.

O CCRS é definido da seguinte forma (McCARTHY, 1996):

- o eixo X^C aponta para o equinócio vernal médio às 12 h TDB (Tempo Dinâmico Baricêntrico) do dia primeiro de janeiro de 2000 (época de referência J2000);
- o eixo Z^C aponta na direção do pólo norte celeste médio, na época de referência J2000;
- o eixo Y^C completa o sistema dextrógiro.

A realização do CCRS se faz por um catálogo de coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação) de fontes de rádio extragaláticas denominadas *Quasars* (*Quase Stellar Radio Source*), na época de referência J2000

(01 de janeiro de 2000, ou dia Juliano 2451545,0), calculada de maneira a não apresentar movimento próprio. O ICRF (*IERS Celestial Reference Frame*), referencial estabelecido pelo IERS, é uma realização do CCRS.

Quanto ao CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System*), sua definição é feita da seguinte maneira:

- geocêntrico, origem coincidente com o centro de massa da Terra, considerando-a integralmente, isto é, incluindo oceanos e atmosfera;
- escala correspondente à de um sistema de referência terrestre, no sentido relativístico da teoria da gravitação;
- orientação dada pelo BIH (Bureau International de l'Heure), para a época 1984,0;
- a evolução temporal de sua orientação não deve produzir rotação residual global com relação à crosta.

O CTRS é realizado por meio de um catálogo de coordenadas e velocidades de um conjunto de estações do IERS, denominado ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) (seção (3.3)). As técnicas espaciais utilizadas no levantamento de tais estações são, em geral: VLBI, SLR, GPS e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*).

A realização de um CTRS deve, de preferência, ser especificada em coordenadas cartesianas X, Y e Z. O eixo Z aponta na direção do CTP (*Conventional Terrestrial Pole* – Pólo Terrestre Convencional), o eixo X na direção média do Meridiano de Greenwich, e o eixo Y de modo a tornar o sistema dextrógiro. Se coordenadas geodésicas são necessárias, recomenda-se usar o elipsóide GRS-80 (*Global Reference System* – Sistema de Referência Global) (MONICO, 2000, p. 63).

Por ser um sistema fixo à Terra, o CTRS rotaciona com ela. Sua escala está relacionada com a referência de tempo utilizada e a evolução temporal de sua orientação é garantida pela introdução da condição de um referencial NNR (No Net Rotation) (McCARTHY, 1996).

A transformação do CCRS para o CTRS é efetuada usando uma sequência de rotações que levam em consideração a precessão (P), a nutação (N), a rotação e orientação da Terra (S), incluindo o movimento do pólo. A transformação é efetuada a partir da seguinte expressão:

$$\vec{X}^T = SNP\vec{X}^C, \quad (3.1)$$

onde $\vec{X}^C$ e $\vec{X}^T$ representam, respectivamente, vetores posicionais nos sistemas celeste e terrestre (MONICO, 2000, p. 63).

Efetuando-se esta transformação, são então eliminadas as influências externas à Terra (precessão e nutação). No entanto, seu eixo de rotação ainda varia com respeito à própria figura da Terra, em virtude das propriedades elásticas desta e de sua interação com a atmosfera e oceanos. Maiores detalhes sobre esta transformação podem ser obtidos em Seeber (1993).

3.2 Sistemas de Tempo

O tempo desempenha papel fundamental na Geodésia. Isso se deve ao fato de a maioria dos métodos de medida utilizarem o tempo de percurso de ondas eletromagnéticas como princípio de posicionamento. Outra observação importante diz respeito ao fato de que uma escala uniforme de tempo se faz necessária no intuito de modelar o movimento de satélites artificiais (TORGE, 2001, p. 20).

A definição precisa de tempo é de extrema importância, de forma que, neste momento, tornam-se essenciais três definições relacionadas aos sistemas de tempo: instante, época e intervalo. O conceito de instante representa “quando” determinado evento ocorreu. Época é o instante de ocorrência de um evento que será tomado como origem da contagem de tempo. Intervalo é o tempo decorrido entre duas épocas, medidas em unidades de alguma escala de tempo (MONICO, 2000, p. 67).

Atualmente, dois sistemas de tempo estão em uso: o tempo atômico e o tempo dinâmico. Os receptores GPS registram o instante de tomada

de suas medidas em tempo atômico (tempo GPS ou UTC (*Universal Time Coordinate* – Tempo Universal Coordenado)). Por outro lado, as equações de movimento dos satélites GPS são expressas em tempo dinâmico (BOCK, 1998, p. 7).

O tempo atômico é a base de uma escala de tempo uniforme sobre a Terra, sendo mantido por relógios atômicos. O tempo dinâmico é a variável independente presente nas equações de movimento de corpos em um campo gravitacional, de acordo com a Teoria da Relatividade Geral. Ele é derivado dos movimentos planetários no sistema solar, haja vista que a maioria dos referenciais quase inerciais dos quais se tem conhecimento, em virtude da mesma teoria, está localizada no centro de massa do sistema solar (baricentro). Para maiores detalhes sobre sistemas de tempo, pode-se consultar Monico (2000) e Bock (1998).

3.3 ITRF

Um referencial geodésico terrestre, conforme já mencionado, é composto por dois aspectos. O primeiro se relaciona, basicamente, a um modelo (definição matemática), cuja origem é, geralmente, coincidente com o centro de massa da Terra; nesse caso, é denominado ITRS (*International Terrestrial Reference System*). O segundo está relacionado à materialização do primeiro, mediante o estabelecimento de uma rede de estações geodésicas com coordenadas tridimensionais. Tal materialização recebe o nome de ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

O ITRF é realizado pelo IERS, por meio de um conjunto global de estações que efetuam observações espaciais geodésicas. Em outras palavras, as coordenadas geocêntricas cartesianas e respectivas velocidades dessas estações realizam o ITRS, gerando, conseqüentemente, a materialização do mesmo, denominada ITRF.

De forma geral, as realizações do IERS consistem de duas partes: o ITRF e o ICRF (mencionados na seção (3.1)). Deve-se, entretanto, no

presente momento, descrever apenas informações sobre o ITRF, que é um referencial geocêntrico terrestre.

As diversas técnicas espaciais utilizadas pelo IERS se complementam, de forma a constituir um recurso redundante o suficiente para manter uma estrita interação operacional com outros programas astronômicos e geofísicos globais.

As realizações do ITRS (ITRFs), designadas, para cada realização, por ITRFyy, são efetuadas na ocasião do ajustamento de várias SSCs (*Set of Station Coordinates* – Lista de Coordenadas das Estações), obtidas a partir de várias tecnologias apropriadas ao posicionamento espacial, tais como SLR, LLR, VLBI. Os números “yy” que vêm na sequência da designação ITRF especificam o último ano cujos dados foram utilizados na realização (*frame*).

Ao final, se obtém uma lista de coordenadas e velocidades das estações, bem como os parâmetros de transformação entre as diversas SSCs. O GPS passou a contribuir com o ITRF em 1991, e o DORIS em 1994 (MONICO, 2000, p. 72).

3.3.1 Características do ITRF e suas Soluções

O Serviço Internacional de Rotação da Terra, já conhecido sob a sigla IERS, substituiu, em 1988, o BIH. O início das atividades do BIH, em 1985, se deu com a realização do CTRS, denominada CTRF (*Conventional Terrestrial Reference Frame*). As realizações do BTS (*BIH Terrestrial System*) são denominadas BTS 84, BTS 85, BTS 86 e BTS 87 (BOUCHER & ALTAMIMI, 1989).

Em 1988, tal função foi transferida para o IERS, que passou a publicar, anualmente, as soluções (realizações) ITRF. A realização inicial é denominada ITRF-0, na qual foram adotadas a origem, orientação e escala do BTS 87 (BOUCHER & ALTAMIMI, 1989). As sucessivas realizações ITRF são, após a inicial: ITRF 88, ITRF 89, ITRF 90, ..., ITRF 94, ITRF 96, ITRF 97 e, atualmente, ITRF 2000. Vale observar a ausência das realizações para os anos 1995, 1998 e 1999.

O fato de haver realizações ITRF anuais pode, de uma certa forma, causar algum desconforto nos profissionais da área, haja vista que a maioria deles deseja dispor de um sistema de referência que não se altere durante um período razoavelmente longo. Entretanto, não se deve confundir o sistema com sua realização. De certa forma, o fato de surgirem novas realizações não implica na alteração do sistema. O que ocorre, em alguns casos, é que a definição do sistema permanece inalterada (ou sofre mínimas alterações), ocorrendo apenas uma atualização no que diz respeito à seleção das estações que comporão as subseqüentes realizações.

A última realização disponível do ITRS é o ITRF 2000. Essa realização é bastante similar ao ITRF 97. A orientação, a origem, a escala e a evolução temporal do ITRF 2000 foram definidas de modo a serem iguais às do ITRF 97 e, conseqüentemente, iguais às do ITRF 96 e do ITRF 94.

Pode haver um aumento (densificação) ou diminuição da quantidade de estações que compõem uma nova materialização, bem como a integração de diferentes técnicas geodésicas. Por exemplo, uma única localidade sobre a Terra pode envolver diferentes técnicas de observação, tais como: GPS com VLBI, GPS com LLR e SLR, DORIS com GPS e VLBI, e assim por diante. Elas devem ser conectadas por levantamentos geodésicos locais.

Nas soluções ITRF, as técnicas SLR, GPS e DORIS proporcionam a origem do sistema, ou seja, o geocentro, pois seus dados podem ser modelados dinamicamente. VLBI, SLR e GPS proporcionam a escala, enquanto a orientação é definida pelos parâmetros de orientação da Terra determinados pelo IERS, numa época de referência específica. Vale ressaltar que uma estação pode fazer parte de vários centros (MONICO, 2000, p. 72).

O vetor posição atual, r , de um ponto sobre a superfície terrestre é derivado da posição desse ponto à uma época de referência t_0 , pela seguinte expressão (TORGE, 2001, p. 37):

$$r(t) = r_0 + \dot{r}_0(t - t_0), \quad (3.2)$$

onde r_0 e $\dot{r}_0$ são, respectivamente, a posição e a velocidade, à época t_0 .

As primeiras realizações do ITRF, até o ITRF 91, determinavam a evolução temporal das estações a partir do modelo geofísico de velocidade das placas litosféricas, denominado NNR-NUVEL 1. A partir do ITRF 91, realização ocorrida em 1991, passou a se estimar durante o processo, não somente a posição de cada estação, mas também sua respectiva velocidade. Conseqüentemente, o modelo geofísico NUVEL 1 (versão anterior) passou a ser utilizado como informação adicional.

Exceto o fato de que a velocidade das estações passou a ser estimada no processo, até a realização ITRF 92, todas as realizações anteriores do ITRS mantiveram praticamente o mesmo padrão.

Por sua vez, a solução global combinada para o ITRF 93 pode ser dividida em três partes (ou etapas):

- um conjunto de coordenadas de estações referidas à época 1998,0;
- um conjunto de coordenadas de estações referidas à época 1993,0;
- um campo de velocidade consistente com os dois conjuntos citados acima, porém obtido de forma diferente para cada época de referência.

Ou seja, no ITRF 93, houve uma mudança com relação às anteriores, no que diz respeito à orientação da rede. Até então, adotava-se como injunção uma orientação com relação a uma rede NNR, relativa ao ano de 1988,0. No ITRF 93, época de referência 1993,0, a orientação e a variação temporal do ITRS passaram a ser consistentes com os parâmetros de rotação da Terra (EOP) produzidos pelo IERS.

Nessa realização, o modelo geofísico de movimento de placas, utilizado como informação adicional, passou a ser uma nova versão do NUVEL, denominada NNR-NUVEL 1A, que difere do modelo antigo por um fator adequado de 0,9562, em virtude de uma recalibração da escala de tempo

geomagnética (<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/solutions.html>, acessado em 28/05/2002).

No ITRF 94, as estações foram classificadas de acordo com a qualidade de suas coordenadas e respectivas velocidades, e a matriz variância-covariância de cada solução individual foi considerada na combinação de todas as soluções. As estações foram classificadas em quatro categorias, A, B, C e Z, sendo a confiabilidade o critério principal adotado nessa classificação (MONICO, 2000, p. 74).

Tais estações foram determinadas de forma que pelo menos duas técnicas independentes apresentassem resultados melhores que um certo nível de precisão. Dessa forma, as estações classe A deveriam apresentar precisão melhor que 2 cm nas épocas 1988,0 e 1993,0. Estações que não pertencessem à classe A, mas que tivessem precisão melhor que 3 cm em 1993,0, deveriam pertencer à classe B. Se a estação não pudesse ser incluída nas classes A ou B, mas não apresentasse nenhum resíduo muito elevado nos resultados, esta seria classificada como de classe C. Por fim, as estações que apresentassem resíduos muito elevados, em razão de algum erro grosseiro na determinação dos resultados, seriam estações de classe Z (<ftp://lareg.ensg.ign.fr/pub/itrf/itrf94/ITRF94CLA>, acessado em 28/05/2002).

No que diz respeito à orientação da rede, o ITRF 94 está injuncionado ao ITRF 92 na época 1988,0, e a evolução no tempo segue o modelo geofísico NNR-NUVEL 1A. Dessa forma, o ITRF 94 está consistente com os parâmetros de orientação da Terra publicados pelo IERS (BOUCHER et al., 1996).

A versão de 1995 do ITRS não foi realizada. Segundo Monico (2000, p. 75), naquela época, observou-se que, com o nível de precisão atingido no ITRF 94, uma série de detalhes não considerados até aquele momento no modelo merecia estudos mais detalhados. Um grupo de trabalho foi criado, e as recomendações finais desse grupo foram apresentadas num *workshop* sobre o ITRF. Mas, considerando as necessidades dos usuários naquela época, decidiu-se

por continuar com as publicações anuais do ITRF antes da apresentação final das recomendações do grupo de trabalho.

Apesar do desejo que os profissionais da área demonstram com relação a se ter um referencial que praticamente não se altere com o tempo, fica evidente, de acordo com o parágrafo anterior, que o estabelecimento de realizações anuais se torna necessário. Mesmo porque, o sistema praticamente não se altera, mas sim sua materialização.

Dessa forma, com a ausência do ITRF 95, a realização do ITRS, posterior ao ITRF 94, é designada ITRF 96. A orientação, a origem, a escala e a evolução temporal do ITRF 96 foram definidas de modo a serem iguais às do ITRF 94. Nos locais onde há mais de uma estação, mesmo que com técnicas diferentes, as componentes da velocidade são consideradas iguais, e as soluções individuais foram consideradas estatisticamente independentes, cada uma com matriz variância-covariância conhecida, a menos de um fator de escala.

A época de referência para as coordenadas e velocidades estimadas no ITRF 96 é 1997,0. Nesta realização, foram consideradas mais de 500 estações, estabelecidas em 290 locais (BOUCHER et al., 1998).

A realização ITRF 97 contou com a participação de mais de 550 estações, estabelecidas em aproximadamente 320 localidades, sendo estimadas as coordenadas cartesianas e respectivas velocidades de cada estação (BOUCHER et al., 1999). A acurácia de seus resultados depende da técnica de observação utilizada, atingindo os melhores valores para as observações feitas com VLBI, SLR e GPS. Foram considerados alguns efeitos variantes com o tempo, tais como: marés terrestres, carga dos oceanos, carga da atmosfera e efeitos causados por movimentação glacial (TORGE, 2001, p. 36).

Vale lembrar que a orientação, a origem, a escala e a evolução temporal do ITRF 97 foram definidas de modo a serem iguais às do ITRF 96 e às do ITRF 94.

A última realização do ITRS é, até o presente momento, a solução ITRF 2000. Com base nas recomendações discutidas num *workshop* sobre o ITRF 2000, estabeleceu-se um consenso geral de que todos os possíveis *outliers*

(erros grosseiros, de forma geral) presentes nas soluções individuais fossem removidos, antes de se gerar uma solução global final para esta realização. De fato, os *outliers* rejeitados representaram aproximadamente 1% do conjunto total de dados considerado para a combinação final do ITRF 2000 (ALTAMIMI et al, 2002).

Das soluções adequadas a compor a solução global final do ITRF 2000, 3 delas são de VLBI, 7 de SLR, 1 de LLR, 6 de soluções globais GPS, 2 de DORIS, além de 1 solução gerada a partir da combinação de mais de uma técnica. Adicionalmente, outras 6 soluções GPS, geradas a partir de projetos de densificação regional, são diretamente utilizadas para compor a combinação global.

No ITRF 2000, ficou estabelecido que a técnica SLR deve proporcionar a origem do sistema; a escala é determinada pela combinação das soluções SLR e VLBI; enquanto a orientação do ITRF 2000 é consistente com a do ITRF 97, à época 1997,0. A evolução temporal de sua orientação segue, convencionalmente, a do modelo geofísico NNR-NUVEL 1A (ALTAMIMI et al., 2002).

No que diz respeito à orientação, os critérios adotados para selecionar as localidades cujas soluções fariam parte da combinação global são:

- observações realizadas continuamente por um período mínimo de 3 anos;
- locais que estivessem afastados de regiões de bordas de placas e de zonas de deformação crustal;
- valores de velocidade com precisão (na combinação) melhor que 3 mm/ano;
- valores de velocidade que apresentassem resíduos menores que 3 mm/ano para, no mínimo, 3 diferentes soluções.

Esta seleção de estações geodésicas de alta qualidade deve assegurar a definição de um *datum* com precisão de aproximadamente 1 mm. A atual rede de estações que compõe o ITRF 2000 é a mais extensiva e acurada de todas as estabelecidas até o presente momento, contando com aproximadamente

800 estações estabelecidas em aproximadamente 500 localidades, com melhor distribuição sobre a superfície terrestre, se comparada com as versões ITRFyy anteriores. Aproximadamente 50% das posições das estações são determinadas com qualidade superior a 1 cm, ao passo que cerca de 100 localidades têm suas velocidades estimadas com precisão de (ou melhor que) 1 mm/ano.

Maiores informações sobre as recomendações estabelecidas para o ITRF 2000 podem ser obtidas Boucher (2001).

Importante observar o fato das épocas de referência dos vários ITRFs variarem ao longo de cada realização, sem ser apresentada uma justificativa adequada para tal. Portanto, uma parte extra desta pesquisa foi investigar a influência da época de referência na solução final. Detalhes desse estudo podem ser vistos no Apêndice A.

3.3.2 Transformação de Similaridade

Sabe-se que, nos métodos de processamento de observações GPS, as coordenadas finais dos pontos observados vêm sempre expressos na rede de coordenadas das efemérides usadas durante a redução dos dados de campo. Assim, como há vários tipos de órbitas ao alcance de usuários da técnica GPS, os resultados finais vêm expressos em diversas redes de referência que, por sua vez, dependem da natureza das efemérides adotadas durante o processamento das observações.

O IGS distribui efemérides precisas dos satélites da constelação GPS, no sistema de coordenadas dos vários ITRFs. Muitas das estações GPS que constituem um específico ITRF (por exemplo, o ITRF97), pertencem à rede ativa do IGS, que faz o rastreamento permanente dos satélites da constelação GPS. As posições dos pontos de referência nas antenas desses receptores são úteis como pontos de controle para calcular órbitas e para propagar coordenadas em pontos geodésicos. Em geral, as coordenadas e velocidades destes pontos são conhecidas em relação a uma rede de referência geocêntrica rigorosamente definida, e por isso servem para propagar coordenadas a outros pontos arbitrários, usando métodos diferenciais.

A transformação rigorosa de coordenadas entre dois sistemas cartesianos terrestres arbitrários como, por exemplo, o ITRF_{yy} (época t_0) e o ITRF_{zz} (época t), de um ponto P qualquer, pode ser obtida da seguinte equação (SAPUCCI & MONICO, 2001):

$$X_{ITRF_{zz}} = T_x + (1 + s) * [\varepsilon + I] * [X_{ITRF_{yy}} + V_{ITRF_{yy}} * (t - t_0)] , \quad (3.3)$$

onde

- T_x são as coordenadas da origem da rede ITRF_{yy} na rede ITRF_{zz}, isto é, a translação entre as origens dos sistemas coordenados;
- ε são rotações diferenciais, em radianos, em torno dos eixos x , y e z da rede ITRF_{yy}, para estabelecer paralelismo com a rede ITRF_{zz};
- s é o fator diferencial de escala, expresso em ppm (10^{-6});
- $X_{ITRF_{yy}}$ é o vetor das coordenadas do ponto P no sistema coordenado ITRF_{yy}, na época t_0 ;
- $V_{ITRF_{yy}}$ são as componentes lineares referidas aos eixos cartesianos do campo de velocidade associado ao ponto $X_{ITRF_{yy}}$, em virtude do movimento da placa litosférica que contém o ponto P ;
- $(t - t_0)$ é o intervalo de tempo expresso em anos e sua fração, que, na prática, é aproximado para o tempo médio do período observado.

Vale notar que as denominações ITRF_{yy} e ITRF_{zz} representam duas redes de referência arbitrárias, devendo ser substituídas na fórmula, caso os sistemas de referência em questão sejam outros. Esse conceito pode ser usado, por exemplo, para transformar soluções do referencial das efemérides para um dos ITRFs. Entretanto, não é o caso do presente trabalho, no qual as órbitas

(fiduciais)¹⁸ utilizadas no processamento já estão vinculadas ao ITRF 97 e, portanto, as soluções de coordenadas obtidas também.

3.4 WGS 84

Nesta seção, caberá apenas uma breve descrição sobre este sistema de referência que, apesar de ser fundamental para o sistema GPS, não se adapta adequadamente aos objetivos do presente trabalho, no que diz respeito ao fator “precisão”.

O sistema de referência terrestre utilizado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (U. S. Department of Defense – DoD), para posicionamento com GPS, é o World Geodetic System 1984 (WGS 84), haja vista ser o datum do sistema GPS.

Entretanto, o WGS 84 só é efetivamente válido quando o processamento dos dados coletados pelo receptor é feito utilizando-se as efemérides transmitidas. Caso o usuário venha a utilizar efemérides precisas (pós-processadas), o sistema de referência deve ser um dos diversos ITRFs, identificado na respectiva efeméride.

Portanto, vale ressaltar que, quando se objetiva realizar algum tipo de posicionamento que requeira alta precisão dos resultados, o WGS 84 não é o sistema de referência mais adequado para essa específica situação. Deve-se, portanto, adotar a última realização do ITRS, para a época em questão.

O WGS 84 é um sistema global definido originalmente pelo DoD, baseado em observações Doppler realizadas pelo sistema TRANSIT (predecessor do GPS) (BOCK, 1998, p. 29). Sua origem é o centro de massa da Terra, com os eixos cartesianos X, Y e Z idênticos aos do CTRS, para a época 1984,0. O elipsóide de referência é o WGS 84 (*World Geodetic System 1984*), um elipsóide de revolução geocêntrico.

Na primeira realização do WGS 84, foram utilizadas 1591 estações determinadas pelo DMA (*Defense Mapping Agency*), atual NIMA

¹⁸ Produzidas com base em informações de algumas estações fundamentais localizadas sobre a superfície terrestre.

(*National Imagery and Mapping Agency*), usando observações Doppler do sistema TRANSIT, atingindo precisão da ordem de 1 a 2 m. Entre essas estações, estão as estações monitoras do GPS: Colorado, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein e Hawaii. Refinamentos têm sido realizados usando técnica de posicionamento por GPS, com o objetivo de melhorar a precisão das coordenadas das estações monitoras. Além das estações citadas antes, fizeram parte dos refinamentos, estações do NIMA. Essas novas realizações foram denominadas WGS 84 (G730) (MALYS & SLATER¹⁹ apud MONICO, 2000, p. 78) e WGS 84 (G873) (MALYS et al.²⁰ apud MONICO, 2000, p. 78), onde G representa que o refinamento foi efetuado usando GPS, e 730 e 873 representam as semanas GPS em que ocorreram as realizações. A precisão (em termos do desvio padrão formal) da resultante das coordenadas de cada estação foi da ordem de 10 cm para o WGS 84 (G730) e de 5 cm para o WGS 84 (G873). A mais recente realização do WGS 84 é denominada WGS 84 (G 1150), e está prestes a ser oficializada (MONICO, 2002²¹).

3.5 Sistema de Referência Geodésico Local

No intuito de se obter uma referência visualmente concreta para a variação das coordenadas de estações localizadas sobre uma determinada placa litosférica, pode ser conveniente ilustrar o campo de velocidades dessas estações em termos de suas componentes geodésicas locais (N , E , u). Para o caso específico do presente trabalho, são originalmente obtidas as coordenadas das estações em termos de suas componentes cartesianas (X , Y , Z), no ITRF 97.

Portanto, para efeito de análise dos vetores de velocidade de tais estações, suas componentes cartesianas não devem ser as mais adequadas para se obter uma ilustração gráfica de tais velocidades; é, portanto, mais conveniente

¹⁹ MALYS, S.; SLATER, J. A. “*Maintenance and Enhancement of the World Geodetic System 1984*”. In: **ION GPS-94**, Salt Lake City, Utah. Proceedings..., v. I, p. 17-24, 1994.

²⁰ MALYS, S.; SLATER, J. A.; SMITH, W. R.; KANZ, L. E.; KENYON, S. C. “*Refinements of the World Geodetic System*”. In: **ION GPS-97**, Kansas. Proceedings..., p. 841-50, 1997.

²¹ Comunicação pessoal do Autor (outubro de 2002).

indicá-las, graficamente, num sistema geodésico local, no qual se têm, como referência, as direções E (Leste) e N (Norte).

Um sistema geodésico local é definido da seguinte forma (SOLER & HOTHEM, 1988, p. 90):

- sua origem pode ser qualquer ponto P de coordenadas geodésicas curvilíneas (λ, φ, h) , referido a um dado elipsóide de referência;
- o eixo u (up) é normal ao elipsóide de referência, no ponto P , e possui sentido positivo contrário ao sentido do vetor de gravidade, ou seja, para o exterior do elipsóide, orientado para o zênite geodésico;
- o eixo E é normal a u e ao plano meridiano geodésico (quando a altitude geométrica h é igual a zero, este eixo é tangente ao paralelo geodésico de P), e possui sinal positivo a leste do meridiano geodésico, no sentido crescente da longitude λ ;
- o eixo N é perpendicular a E e u , formando um terno dextrógiro (quando $h = 0$, o eixo N é tangente ao meridiano geodésico de P), e possui sinal positivo no sentido crescente da latitude φ .

A transformação das coordenadas cartesianas em coordenadas do sistema geodésico local é dada pela seguinte expressão (SOLER & HOTHEM, 1988, p. 93):

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ u \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

onde $[R]$ é a matriz de rotação, dada por:

$$[R] = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

3.6 Posicionamento GPS de Alta Precisão

Quando deve ser realizada qualquer atividade de posicionamento que exige precisão melhor que aquela requerida para fins cartográficos, dois métodos bastante requisitados são o Posicionamento por Ponto Preciso e o Posicionamento Relativo.

Como o Posicionamento por Ponto envolve diferentes níveis de precisão, torna-se conveniente uma breve introdução sobre o mesmo, antes de mencionar as características próprias do caso em que este é preciso.

3.6.1 Posicionamento por Ponto (*Absoluto*)

Nesse tipo de posicionamento, necessita-se apenas de um receptor. Em geral, dependendo da precisão e acurácia requeridas para uma específica aplicação do GPS, o Posicionamento por Ponto pode ser dividido em três categorias: Convencional, Preciso e de Alta Precisão.

Como se percebe atualmente no meio científico, há uma tendência no sentido de abolir o termo “alta precisão”, classificando o Posicionamento por Ponto em apenas duas categorias: o Convencional e o Preciso. Dessa forma, a expressão “Posicionamento por Ponto Preciso” se encarrega das duas últimas classificações citadas no primeiro parágrafo desta seção.

O primeiro tipo é muito utilizado em navegação de baixa precisão e em levantamentos expeditos (MONICO, 2000, p. 184), não sendo, portanto, adequado para aplicações em Geodinâmica.

Posicionamento por ponto a partir de dados GPS pode proporcionar precisão que varia de 100 metros (até o desligamento da SA) até poucos milímetros, ao nível de probabilidade de 95%. Para alcançar o melhor

nível de precisão, o usuário deve dispor de equipamento e *software* adequados, bem como capacidade para acessar produtos GPS disponibilizados pelo IGS (MONICO, 2000, p. 184).

Para as aplicações que requerem maior precisão, não há necessidade de posicionamento em tempo real, ou seja, as observações podem ser pós-processadas. Portanto, é possível utilizar as efemérides precisas e as correções para os relógios dos satélites, produzidas pelo IGS, ambas com precisão de poucos centímetros. Entretanto, tal procedimento ainda não fornece precisão suficiente para a maioria das aplicações do GPS à Geodinâmica.

Quando se deseja monitorar o movimento das placas litosféricas, bem como grande parte de outros fenômenos geodinâmicos, deve-se optar por utilizar ambas as observáveis fase da onda portadora e pseudodistância coletadas por receptores de dupla frequência, em conjunto com os produtos IGS. Dessa forma, o posicionamento por ponto pode proporcionar resultados similares aos casos em que dados de vários receptores são processados em conjunto, numa rede GPS. E o que é mais importante, segundo Zumberge et al. (1997), com um baixo custo computacional. É, portanto, um método com grande potencialidade para aplicações geodinâmicas, podendo ser denominado Posicionamento por Ponto Preciso. Segundo Monico (2000), esse tipo de posicionamento oferece grandes vantagens sobre o processamento de redes GPS, onde há grande dispêndio computacional.

3.6.1.1 Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Este é, como já mencionado, o tipo de posicionamento por ponto mais adequado às aplicações do GPS à Geodinâmica, no qual é imprescindível ter à disposição dados de receptores de dupla frequência, ou seja, com as observáveis pseudodistância e fase nas duas portadoras (L1 e L2). Logo, têm-se duas equações de observação, ambas para pseudodistância e fase da onda portadora, sendo escritas na forma linearizada como (MONICO, 2000a):

$$\begin{aligned}
 E(\Delta PD_{L_1}) &= a_A^j \Delta X_A + b_A^j \Delta Y_A + c_A^j \Delta Z_A + c(dt_A - dt^j) + T_A^j + I_A^j \\
 E(\Delta PD_{L_2}) &= a_A^j \Delta X_A + b_A^j \Delta Y_A + c_A^j \Delta Z_A + c(dt_A - dt^j) + T_A^j + \bar{I}_A^j,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 E(\lambda_1 \Delta \phi_{A1}^j) &= a_A^j \Delta X_A + b_A^j \Delta Y_A + c_A^j \Delta Z_A + c(dt_A - dt^j) + T_A^j - I_A^j + \\
 &\quad \lambda_1 [\phi^j(t_0)_1 - \phi_A(t_0)_1 + N_{A1}^j] \\
 E(\lambda_2 \Delta \phi_{A2}^j) &= a_A^j \Delta X_A + b_A^j \Delta Y_A + c_A^j \Delta Z_A + c(dt_A - dt^j) + T_A^j - \bar{I}_A^j + \\
 &\quad \lambda_2 [\phi^j(t_0)_2 - \phi_A(t_0)_2 + N_{A2}^j]
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

onde se têm

- $\Delta \phi_{A1}^j$ e $\Delta \phi_{A2}^j$, referentes às fases das ondas portadoras observadas e subtraídas das calculadas, em razão dos parâmetros aproximados para L1 e L2, respectivamente;
- λ_1 e λ_2 são os comprimentos de onda das portadoras L1 e L2, respectivamente;
- I_A^j e $\bar{I}_A^j$ referem-se à refração ionosférica nas portadoras L1 e L2, para o satélite j ;
- $\phi^j(t_0)_1$ e $\phi^j(t_0)_2$ referem-se, respectivamente, às fases das portadoras L1 e L2, geradas no satélite j , para uma época de referência t_0 ;
- $\phi_A(t_0)_1$ e $\phi_A(t_0)_2$ referem-se, respectivamente, às fases das portadoras L1 e L2, geradas no receptor A, para uma época de referência t_0 ;
- N_{A1}^j e N_{A2}^j representam as ambigüidades nas portadoras L1 e L2, respectivamente; e
- a_A^j , b_A^j e c_A^j , referentes às derivadas parciais da distância geométrica com relação aos parâmetros aproximados.

Deve-se notar, nesse caso, que o sinal do efeito da refração ionosférica é negativo, uma vez que, para tal efeito, a fase sofre um avanço (e um encurtamento). Ao passo que, na equação da pseudodistância, tal efeito é aditivo,

pois, neste caso, a pseudodistância sofre um retardo (e um alongamento). O fato da velocidade da fase sofrer um avanço é justificado pela dependência da refração ionosférica com a frequência do sinal e pelas características de um meio dispersivo que a ionosfera assume.

Trata-se, portanto, de um processamento que envolve quatro observáveis para cada um dos satélites “visíveis” em cada época. As duas observáveis de fase de batimento da onda portadora podem ser combinadas linearmente, reduzindo sobremaneira os efeitos da refração ionosférica. Procedimento similar pode ser realizado com as pseudodistâncias. A utilização de um dos vários modelos disponíveis para modelar os efeitos da refração troposférica, em conjunto com alguma técnica de parametrização, reduz os efeitos da refração troposférica. Pode-se ainda utilizar as efemérides produzidas pelo IGS, que fornecem as coordenadas e os erros dos relógios dos satélites, ficando o posicionamento isento dos efeitos da SA (se estiver ativada, é claro) (MONICO, 2000, p. 194).

Segundo Zumberge et al. (1997), mostra-se que, com esta técnica, é possível obter precisão de poucos milímetros e de poucos centímetros para as componentes horizontal e vertical, respectivamente. Neste caso, trata-se do posicionamento por ponto estático, para um período de 24 horas de dados, coletados a uma taxa de 30 segundos (MONICO, 2000a).

Vale frisar também a importância do desempenho que pode ser obtido com o Posicionamento Relativo, com relação às aplicações em Geodinâmica. Entretanto, um bom motivo para se escolher o PPP, em vez do Relativo, é o não comparecimento de correlação entre as coordenadas das estações. Portanto, neste trabalho, não deverá ser dada ênfase ao método relativo.

4 METODOLOGIA

4.1 *Software*

O *software* utilizado para o processamento dos dados GPS foi o GIPSY OASIS II (**GPS Inferred Positioning SYstem - *Orbit Analysis and Simulation Software***), ou, simplesmente, GOA II (GREGORIUS, 1996). Vale também mencionar o *software* GAS (**GPS Analysis Software**), tido como uma segunda opção para o processamento.

Apesar de ter sido desenvolvido um estágio, no intuito de aprender a manusear ambos os *software*, o GAS não foi efetivamente utilizado para o processamento dos dados, ficando tal tarefa exclusivamente direcionada à utilização do *software* GOA II.

O GIPSY OASIS II é propício para realizar vários tipos de processamentos. Entre eles, o que utiliza a técnica de Posicionamento por Ponto Preciso. Além de dados GPS, as mais recentes versões liberadas à comunidade (científica, em geral), atualmente possuem capacidade para processar observações SLR, Topex (*Topography Experiment*) e DORIS.

O GIPSY pode processar dados em todos os modos, desde o estático até o totalmente cinemático, e é reconhecido pelo seu Filtro de Informação de Raiz Quadrada (SRIF - *Square Root Information Filter*), por ser altamente estável numericamente. Foi inicialmente desenvolvido para funcionar em sistema operacional VMS, mas as versões mais recentes agora funcionam em sistema UNIX. GIPSY e OASIS são, atualmente, dois pacotes computacionais separados que, no entanto, usam módulos comuns. O GIPSY foi designado para aplicações geodésicas padrão, ao passo que o OASIS é um pacote para análise de covariância para órbitas terrestres e missões hiper-espaciais.

A maior diferença com respeito a outros pacotes computacionais para posicionamento preciso com GPS, é que o GIPSY não usa duplas-

diferenças²² (em vez disso, ele determina os parâmetros do relógio), reduzindo dados de fase e pseudodistância simultaneamente.

Utilizando termos semelhantes aos das equações (3.6) e (3.7), o GIPSY modela as observações ϕ (fase da onda portadora) e PD (pseudodistância), por meio das seguintes expressões:

$$\phi = \rho + c(dt_A - dt^i) + \lambda N - I_A^i + T_A^i, \quad (4.1)$$

$$PD = \rho + c(dt_A - dt^i) + I_A^i + T_A^i, \quad (4.2)$$

onde ρ é a distância entre o receptor e o satélite (dada por $\rho = \|R - r\|$, onde R e r são as distâncias geocêntricas ao satélite e ao receptor, respectivamente), c é a velocidade da luz, dt_A e dt^i são os erros dos relógios do receptor e do satélite, N é a ambigüidade inicial e I_A^i e T_A^i são os atrasos ionosférico e troposférico. Os ruídos dos dados, multicaminho e outros efeitos perturbadores são incorporados em ρ .

Com os dados de entrada, necessários para o processamento, o GIPSY estima os parâmetros e os resíduos com os programas *filter*, *smapper* e *postfit*, utilizando-se do filtro SRIF. As observações são modeladas em função dos parâmetros, ou seja, utilizando ajustamento pelo método paramétrico. Linearizando o modelo, por meio de uma série de Taylor, obtém-se a seguinte expressão (GREGORIUS, 1996, p. 7):

$$z = F(x) \approx F(x_0) + F'(x_0) (x - x_0), \quad (4.3)$$

onde z corresponde às observações, x representa os parâmetros, x_0 os valores nominais dos parâmetros do modelo e $F'(x_0)$ a matriz das derivadas parciais.

Reescrevendo a equação (4.3), tem-se:

$$z = Ax + v, \quad (4.4)$$

²² Duplas diferenças são usualmente formadas entre receptores e satélites. Elas são geradas tomando-se as simples diferenças entre dois receptores e diferenciando-as entre dois satélites.

onde z é a diferença entre o valor observado e o calculado ($z = F(x_0)$), A a matriz das derivadas parciais dos parâmetros, também denominada matriz *design* ($F'(x_0)$), x o vetor correção dos parâmetros ($x - x_0$), e v o vetor dos resíduos. O GIPSY realiza o ajustamento pelo método paramétrico, utilizando-se do SRIF para evitar problemas com inversão de matrizes de ordem muito elevada.

Atualmente, pode-se considerar o GIPSY como um dos *software* que representam o estado da arte em processamento de dados GPS.

4.2 Dados Utilizados

Os dados utilizados nesta pesquisa são referentes a um total de 21 estações. Em relação ao número inicial de estações, previsto no início do projeto (37 estações), cabe aqui ressaltar que nem todas as estações inicialmente selecionadas são estações GPS (em particular, as estações IGS localizadas fora da Placa Sul-Americana). Detectado tal problema, ainda surgiu outro inconveniente: das estações GPS do IGS que restaram, nem todas tinham seus arquivos RINEX²³ disponíveis. Como tais problemas foram detectados durante uma etapa relativamente avançada do projeto, decidiu-se por utilizar apenas as 21 estações disponíveis.

De qualquer forma, as estações IGS selecionadas estão relativamente bem distribuídas, de forma a existir pelo menos uma estação em cada uma das placas litosféricas selecionadas (Tabela 4.1 e Figura 4.1). Portanto, o objetivo de calcular o campo de velocidades para a Placa Sul-Americana, considerando a influência das placas vizinhas, foi mantido. É provável que a análise dos dados tenha ficado empobrecida, sendo que uma maior quantidade de estações consideradas em cada placa vizinha forneceria resultados mais realistas sobre o movimento das mesmas.

²³ RINEX (*Receiver Independent Exchange format*) é um formato específico de arquivo de dados que, por sua vez, é especial para o processamento de dados GPS.

Das 21 estações consideradas, 13 pertencem à RBMC, das quais, 2 pertencem também à rede IGS (Fortaleza e Brasília)²⁴. As outras 8 estações fazem parte da rede IGS. A localização delas está caracterizada de forma a ocupar as seguintes placas litosféricas: Sul-Americana (SOAM), Africana (AFRC), de Nazca (NAZC), Norte-Americana (NOAM) e do Pacífico (PCFC). A Tabela 4.1 apresenta as 21 estações utilizadas no processamento e a Figura 4.1 ilustra a localização de cada uma delas (exceto Crato, que não foi considerada nas análises em razão da baixíssima quantidade de dados disponível para esta).

TABELA 4.1 – Estações da RBMC e do IGS utilizadas no processamento

Estação	Identificação	País	Placa litosférica	Rede
Bom Jesus	BOMJ	Brasil	SOAM	RBMC
Brasília	BRAZ	Brasil	SOAM	RBMC e IGS
Crato (Ceará)	CRAT	Brasil	SOAM	RBMC
Cuiabá	CUIB	Brasil	SOAM	RBMC
Fortaleza	FORT	Brasil	SOAM	RBMC e IGS
Imperatriz	IMPZ	Brasil	SOAM	RBMC
Manaus	MANA	Brasil	SOAM	RBMC
Curitiba	PARA	Brasil	SOAM	RBMC
Porto Alegre	POAL	Brasil	SOAM	RBMC
Recife	RECF	Brasil	SOAM	RBMC
Salvador	SALV	Brasil	SOAM	RBMC
Pres. Prudente	UEPP	Brasil	SOAM	RBMC
Viçosa	VICO	Brasil	SOAM	RBMC
Ascension	ASC1	Reino Unido	SOAM	IGS
Easter Island	EISL	Chile	NAZC	IGS
Fairbanks	FAIR	USA	NOAM	IGS
Goldstone	GOLD	USA	NOAM	IGS
La Plata	LPGS	Argentina	SOAM	IGS
Pinyon Flats	PIN1	USA	PCFC	IGS
Santiago	SANT	Chile	SOAM	IGS
Sutherland	SUTH	África do Sul	AFRC	IGS

²⁴ Na realidade, estas estações foram primordialmente estabelecidas pelo IGS, sendo posteriormente incorporadas à RBMC.

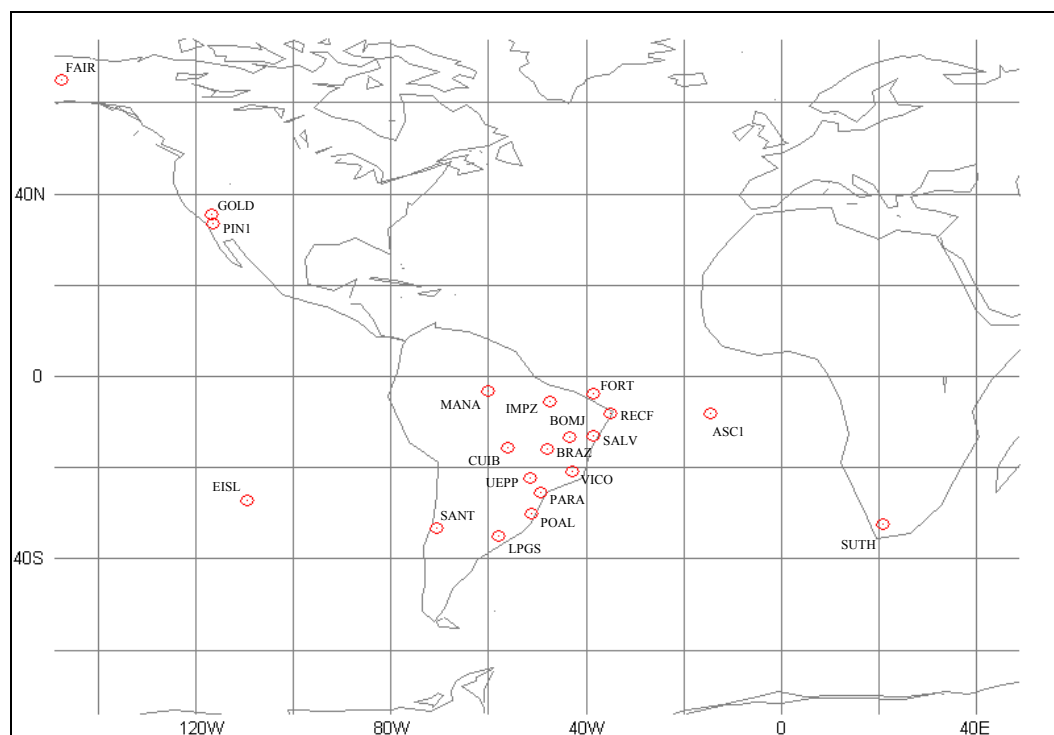


FIGURA 4.1 – Localização das estações utilizadas no processamento

Vale ressaltar que, das 13 estações da RBMC²⁵, a mais recentemente incorporada à rede é a estação Crato (Ceará). Ver-se-á, mais adiante (Tabelas 4.2 a 4.7), que o número de épocas considerado para o processamento dessa estação foi o menor. Além disso, a época de referência escolhida para a obtenção da velocidade das estações foi uma média aritmética aproximada das épocas selecionadas, de forma que os dados da estação Crato são referentes a épocas “afastadas” dessa época média. É provável que, por essa razão, as velocidades obtidas para tal estação se apresentem discrepantes das velocidades para as demais estações.

As Tabelas 4.2 a 4.7 apresentam, a seguir, uma relação de todas as épocas de dados utilizadas no processamento das estações.

²⁵ Recentemente, foram incorporadas as estações Rio de Janeiro (RJ) e Santa Maria (RS), totalizando 15 estações.

TABELA 4.2 – Épocas de dados para 1998 (período: 28 de junho a 12 de julho)

Dias do ano	Estações utilizadas no processamento																	
	BOMJ	BRAZ	CRAT	CUIB	FORT	IMPZ	MANA	PARA	POAL	RECF	SALV	UEPP	VICO	ASC1	EISL	FAIR	GOLD	LPGS
179		X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
180	X	X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
181		X			X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
182		X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
183		X		X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
184		X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
185	X	X		X	X	X	X					X	X					
186	X	X		X	X	X	X					X	X					
187	X	X		X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
188	X	X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
189	X	X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
190		X		X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
191		X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X
192		X		X		X	X					X	X	X	X	X	X	X
193		X		X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X

TABELA 4.3 – Épocas de dados para o primeiro semestre de 1999 (período: 28 de março a 11 de abril)

Dias do ano	Estações utilizadas no processamento																	
	BOMJ	BRAZ	CRAT	CUIB	FORT	IMPZ	MANA	PARA	POAL	RECF	SALV	UEPP	VICO	ASC1	EISL	FAIR	GOLD	LPGS
087	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
088	X	X		X	X	X		X				X	X	X	X	X	X	X
089	X	X		X	X	X		X				X	X	X	X	X	X	X
090	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
091	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
092	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
093	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
094	X	X		X	X	X		X				X	X	X	X	X	X	X
095	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
096	X	X		X	X			X	X			X	X	X	X	X	X	X
097	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
098	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
099	X	X		X	X			X	X			X	X	X	X	X	X	X
100	X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X
101	X	X		X	X			X	X			X	X	X	X	X	X	X

TABELA 4.4 – Épocas de dados para o segundo semestre de 1999 (período: 19 de setembro a 3 de outubro)

Dias do ano	Estações utilizadas no processamento																				
	BOMJ	BRAZ	CRAT	CUIB	FORT	IMPZ	MANA	PARA	POAL	RECF	SALV	UEPP	VICO	ASCI	EISL	FAIR	GOLD	LPGS	PINI	SANT	SUTH
262	X	X		X				X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X
263	X	X		X				X		X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
264	X	X		X				X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
265	X	X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
266	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
267	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
268	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
269	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
270	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
271	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
272	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
273	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
274	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
275	X	X		X		X		X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
276	X	X		X		X		X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	

TABELA 4.5 – Épocas de dados para o primeiro semestre de 2000 (período: 19 de março a 2 de abril)

Dias do ano	Estações utilizadas no processamento																				
	BOMJ	BRAZ	CRAT	CUIB	FORT	IMPZ	MANA	PARA	POAL	RECF	SALV	UEPP	VICO	ASCI	EISL	FAIR	GOLD	LPGS	PINI	SANT	SUTH
079				X		X		X	X	X		X	X	X		X		X	X	X	X
080				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
081				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
082				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
083		X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
084				X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
085				X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
086				X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
087		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
088		X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
089				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
090		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
091		X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
092				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
093				X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X

TABELA 4.6 – Épocas de dados para o segundo semestre de 2000 (período: 17 de setembro a 1 de outubro)

Dias do ano	Estações utilizadas no processamento																	
	BOMJ	BRAZ	CRAT	CUIB	FORT	IMPZ	MANA	PARA	POAL	RECF	SALV	UEPP	VICO	ASCI	EISL	FAIR	GOLD	LPGS
261	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
262	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
263	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
264	X			X			X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	
265	X			X			X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	
266	X			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
267	X			X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
268	X			X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
269	X			X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
270	X			X			X	X	X	X	X	X			X	X	X	
271	X	X		X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
272	X			X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
273	X			X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
274	X	X		X				X	X		X	X		X	X	X	X	X
275	X			X				X	X		X	X		X	X	X	X	X

TABELA 4.7 – Épocas de dados para 2001 (período: 18 de março a 1 de abril)

Dias do ano	Estações utilizadas no processamento																	
	BOMJ	BRAZ	CRAT	CUIB	FORT	IMPZ	MANA	PARA	POAL	RECF	SALV	UEPP	VICO	ASCI	EISL	FAIR	GOLD	LPGS
077		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
078		X	X	X	X			X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
079		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
080		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
081		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
082		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
083		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
084		X	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
085		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
086		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
087		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
088		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
089		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
090		X	X	X	X			X	X	X		X	X		X	X	X	X
091		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X

De acordo com os períodos de dados considerados, escolheu-se então, como referência para o processamento final, a época 19 de março de 2000, que é uma média aritmética aproximada dos dias de dados selecionados. Ou seja,

a solução final de coordenadas e velocidades das estações está referenciada a esta época.

4.3 Processamento dos Dados GPS

As atividades práticas de manuseio do *software* GIPSY OASIS II e a familiarização com o ambiente UNIX desenvolveram-se, na maioria das vezes, no Laboratório de Geodésia Espacial (LGE) da FCT (Faculdade de Ciências e Tecnologia), na UNESP. Nesse laboratório, há uma estação de trabalho SUN Ultra 1, com sistema operacional SunOS 5.5.1, possibilitando, então, o processamento dos dados. Depois de adquirida certa familiaridade com o *software*, foi possível se ausentar do laboratório e dar início efetivo às atividades de processamento, através de um computador conectado, via *telnet* (protocolo usado na *Internet* para permitir que um computador acesse outro e nele execute programas), à estação de trabalho SUN. Tal computador era utilizado na Sala de Permanência dos Alunos de Pós-Graduação, onde se desenvolve a maioria das atividades dos pós-graduandos.

Os elementos utilizados no processamento das estações eram basicamente de dois tipos:

- as órbitas dos satélites GPS;
- os dados de entrada das estações.

Em conjunto com as órbitas (arquivo *peci*), foram utilizados outros 3 arquivos adicionais, com as seguintes denominações: *Shadow*, *TDPfile* e *tpeo.nml*. Convém ressaltar que cada conjunto de arquivos corresponde a uma determinada época.

O arquivo *Shadow* possui informações sobre o eclipse dos satélites em questão. O *peci* fornece as órbitas precisas no formato ECI (*Earth-Centered Inertial*). O *TDPfile* corresponde ao arquivo *Time Dependent Parameter* dos parâmetros precisos dos relógios GPS. Por fim, o arquivo *tpeo.nml* contém informações sobre a rotação da Terra, movimento do pólo e sobre o tempo (CHAVES, 2001, p. 70).

No caso das órbitas, foram utilizadas as efemérides precisas, fiduciais, do JPL. O acesso a elas foi obtido via *ftp anonymous* para *sideshow.jpl.nasa.gov*.

Particularmente, a intenção inicial era obter as efemérides não-fiduciais²⁶ do JPL, no intuito de utilizar, indiretamente, a técnica de ajustamento livre. Entretanto, a disponibilidade desse tipo de órbita não foi verificada para todas as épocas consideradas no processamento. Conseqüentemente, optou-se por utilizar efemérides fiduciais, também do JPL, no processo de ajustamento.

Os dados de entrada são os arquivos RINEX das estações. Os dados das estações da RBMC foram fornecidos pelo IBGE, e os das estações da rede IGS foram obtidos na *Internet*, via *ftp anonymous* para *cddis.gsfc.nasa.gov*.

Antes de iniciar o processamento dos dados, informações atualizadas sobre as estações a serem processadas devem estar inclusas em um diretório específico, criado durante a instalação do *software* GIPSY. Há 4 arquivos nesse diretório: *sta_id*, *sta_pos*, *sta_svec* e *pcenter*.

O arquivo *sta_id* contém um identificador para a estação, um número, um nome e comentários. O *sta_pos* associa o identificador da estação, numa determinada época, às coordenadas e velocidades da mesma. O *sta_svec* estabelece a correspondência entre o identificador da estação e o tipo de antena, o qual deve estar contido no arquivo *pcenter*; além disso, fornece o vetor da estação, a altura da antena, um indicador para o tipo de coordenada utilizada (cartesiana ou local), uma data e um comentário. O último arquivo, *pcenter*, possui o tipo de antena, o tipo do centro de fase e as correções para este último. Estes 4 arquivos devem ser cuidadosamente editados e verificados, antes de se realizar o processamento dos dados.

De posse das efemérides, dos dados GPS e das informações das estações, iniciou-se então o processamento com o GIPSY. Nessa etapa, o usuário tem duas opções: processar manualmente ou automaticamente. A primeira opção requer muito conhecimento do próprio GIPSY, bem como do sistema operacional

²⁶ Produzidas num ajustamento livre.

UNIX. A segunda facilita a vida dos principiantes e das pessoas que não desejam digitar comandos ou escrever *scripts*, menciona Gregorius (1996, p. 105), ao referir-se ao ***xt-gipsy***, uma interface gráfica que permite ao usuário processar dados GPS no GIPSY.

Portanto, considerando-se a grande quantidade de dados a serem processados, optou-se por utilizar o método automático de processamento. Por conveniência, fez-se a opção inicial de processar dados época a época, individualmente, para analisar o resultado fornecido por cada processamento, sendo já esperados tanto sucessos como insucessos. Tais insucessos, quando detectados, ocorriam em razão de vários fatores, desde uma desatenção no manuseio de efemérides e dados, até a possível existência de um arquivo de dados corrompido.

O processamento dos dados era efetivamente realizado ao se digitar a linha de comando ***v_gipsy***, num terminal da estação de trabalho ou no computador conectado a esta, via *telnet*. Esta linha de comando, ao ser digitada, executa um arquivo *batch* (em lote) denominado ***v_gipsy***, que, por sua vez, executa o ***xt-gipsy***. A Figura 4.2 ilustra o arquivo executável ***v_gipsy***, que contém a estratégia utilizada no processamento (seção 4.3.1).

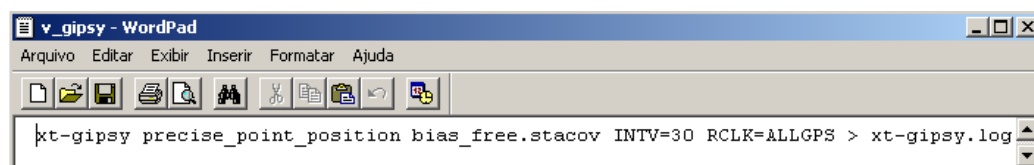
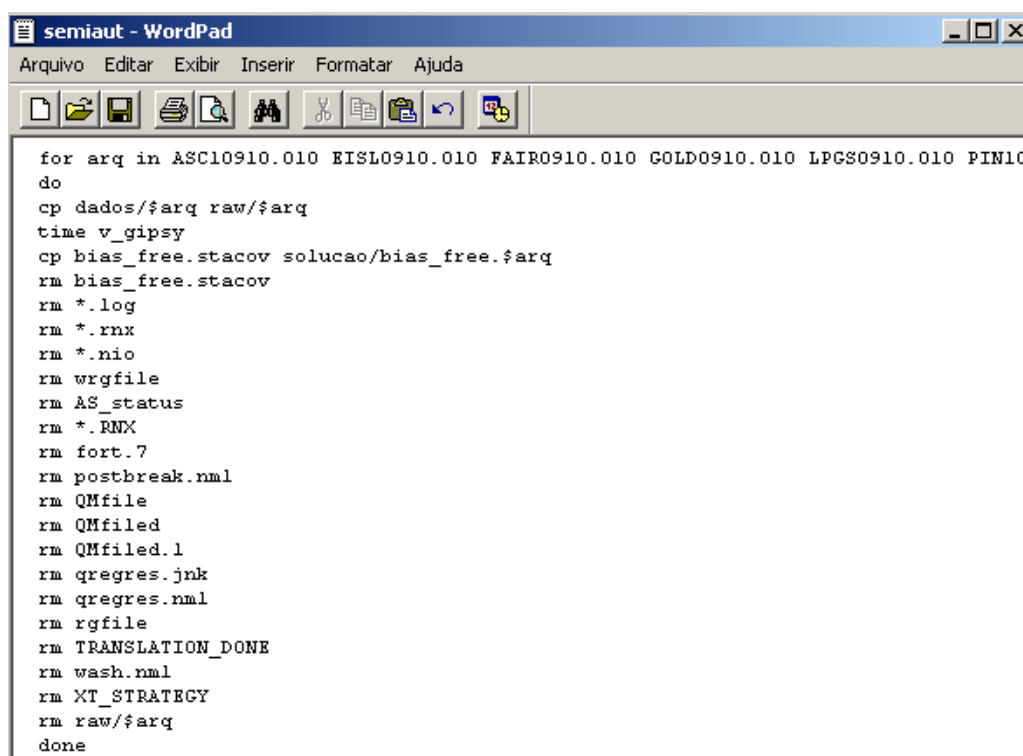


FIGURA 4.2 – O arquivo em lote ***v_gipsy***

O processamento individual de cada dado (arquivo RINEX) constituía um trabalho bastante exaustivo, haja vista que a duração média de cada processamento era de 5 a 10 minutos. Conforme citado na seção (1.2), um dos objetivos deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para o processamento contínuo de estações. Portanto, no intuito de solucionar (pelo menos, parcialmente) essa situação, foi gerado um outro arquivo em lote, também executável, denominado ***semiaut***. Tal denominação se deve justamente ao fato de

se tratar de uma metodologia que ainda não automatiza totalmente o processamento. Entretanto, pode-se considerar um avanço significativo no que diz respeito à redução das vezes em que o operador precisa interferir, para recomençar o processamento de um novo dado.

Um trecho da rotina contida no arquivo executável *semiaut* é ilustrado na Figura 4.3.



```

for arq in ASC10910.01O EISL0910.01O FAIRO910.01O GOLD0910.01O LPGS0910.01O PIN10
do
cp dados/$arq raw/$arq
time v_gipsy
cp bias_free.stacov solucao/bias_free.$arq
rm bias_free.stacov
rm *.log
rm *.rnx
rm *.nio
rm wrgfile
rm AS_status
rm *.RNX
rm fort.7
rm postbreak.nml
rm QMfile
rm QMfiled
rm QMfiled.1
rm qregres.jnk
rm qregres.nml
rm rgfile
rm TRANSLATION_DONE
rm wash.nml
rm XT_STRATEGY
rm raw/$arq
done

```

FIGURA 4.3 – Trecho do arquivo em lote *semiaut*

Dessa forma, ao se digitar a linha de comando **semiaut**, o arquivo de mesmo nome é executado. Tal execução faz com que o arquivo *v_gipsy* seja, por sua vez, executado um número de vezes igual à quantidade de arquivos de dados listados na primeira linha do arquivo *semiaut*. Os arquivos RINEX ficam armazenados no subdiretório *dados*. Ao final do processamento de um determinado dado (ASC10910.01O, por exemplo), o arquivo RINEX subsequente (EISL0910.01O) é copiado para o subdiretório *raw*, localizado no diretório principal, sendo automaticamente removidos todos os arquivos do

processamento anterior que não são de interesse. Dessa maneira, a rotina se repete até que todos os arquivos armazenados no subdiretório *dados* sejam processados.

Deve-se salientar que as efemérides relativas a uma determinada época ficam no diretório principal, onde é realizado o processamento. Como os arquivos que estão armazenados no subdiretório *dados* são da mesma época, ao final de cada lote processado, esses e as respectivas efemérides devem ser substituídos manualmente. Conseqüentemente, os nomes dos novos arquivos que serão processados devem ser editados no arquivo *semiaut*.

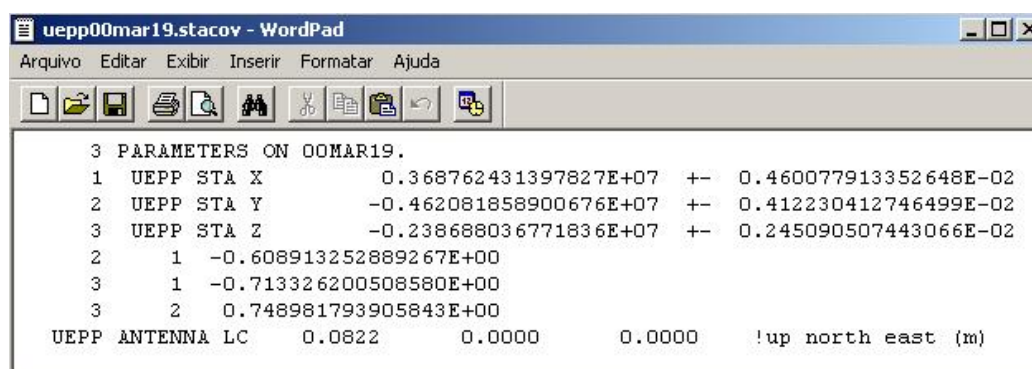
Os arquivos que interessam, resultantes de cada processamento individual, são denominados *bias_free.stacov*. Esses arquivos contêm as soluções de coordenadas cartesianas das respectivas estações envolvidas no processamento. Cada arquivo de solução de coordenadas é renomeado, de acordo com o nome da estação envolvida, sendo posteriormente armazenado (automaticamente) no subdiretório *solucao*.

4.3.1 Estratégia de Processamento

O processamento dos dados, juntamente com as efemérides precisas e as correções para os relógios dos satélites, permitiu obter soluções de coordenadas altamente precisas para cada uma das estações. Para tanto, foi utilizada uma das estratégias de processamento permitidas pelo *software* GIPSY (Figura 4.2), de forma a serem geradas soluções do tipo *bias_free.stacov*, ou seja, soluções obtidas sem resolver as ambigüidades. Fizeram parte do processamento as observações referentes à fase da onda portadora e à pseudodistância, disponíveis nas portadoras L_1 e L_2 . A observável básica foi a combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (*Ionospheric Free Observable*), denominada L_0 . O intervalo de processamento dos dados foi de 30 segundos, com ângulo de elevação igual ou superior a 15° . A técnica de processamento adotada, mencionada com detalhes na seção (3.6.1.1), foi o Posicionamento por Ponto Preciso, escolhida, dentre outras razões, por ser uma técnica na qual não comparece correlação entre as estações e por fornecer resultados bastante precisos.

As efemérides e correções para os relógios dos satélites fornecidas pelo JPL foram produzidas num ajustamento que utiliza a técnica fiducial, de forma que as estações envolvidas estão referenciadas ao ITRF 97.

Os arquivos *bias_free.stacov* contêm, além das coordenadas, outras informações importantes. Um exemplo deste tipo de arquivo é ilustrado na Figura 4.4, contendo informações sobre a estação UEPP relativas à época 19 de março de 2000.



```

3 PARAMETERS ON 00MAR19.
1 UEPP STA X      0.368762431397827E+07 +- 0.460077913352648E-02
2 UEPP STA Y     -0.462081858900676E+07 +- 0.412230412746499E-02
3 UEPP STA Z     -0.238688036771836E+07 +- 0.245090507443066E-02
2      1  -0.608913252889267E+00
3      1  -0.713326200508580E+00
3      2   0.748981793905843E+00
UEPP ANTENNA LC   0.0822   0.0000   0.0000   !up north east (m)

```

FIGURA 4.4 – Arquivo *bias_free.stacov*

A primeira linha do arquivo, de acordo com a figura, informa que 3 parâmetros foram determinados para a estação, ou seja, suas coordenadas cartesianas x , y e z . As três linhas subsequentes indicam os números de referência (1, 2 e 3) e as respectivas identificações das coordenadas das estações, bem como os valores destas e seus respectivos desvios-padrão. Nas linhas 5, 6 e 7, têm-se os valores das correlações entre x e y , x e z , y e z , respectivamente. Por fim, na última linha, têm-se os parâmetros (u , N , E) da antena do receptor, representando as componentes altimétrica, norte e leste, no referencial local.

4.4 Estimativa da Velocidade das Estações (Ajustamento da Rede)

A estimativa dos vetores posição (X) e velocidade (V) numa época t , a partir dos vetores-posição X_{t_1} , X_{t_2} , ..., X_{t_n} , com as respectivas Matrizes Variância-Covariância (MVCs), ΣX_i ($i = t_1, t_2, \dots, t_n$), todas estimadas a

partir de dados GPS, é obtida num processo de ajustamento pelo método paramétrico, a partir das seguintes equações de observação:

$$\begin{aligned}
 X_{t_1} &= X_t + V_t(t - t_1) \\
 X_{t_2} &= X_t + V_t(t - t_2) \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 X_{t_n} &= X_t + V_t(t - t_n)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Em outras palavras, ao se combinar as diversas soluções diárias de coordenadas, quer-se obter os parâmetros X_t e V_t , à época t . Ou seja, ao final do ajustamento, deve ser fornecido, para cada estação, o vetor de seus parâmetros ajustados (X_a), dado por:

$$X_a = \begin{bmatrix} X_t \\ V_t \end{bmatrix}. \tag{4.6}$$

Os parâmetros ajustados devem, então, compor a solução final de coordenadas e velocidades de cada uma das 21 estações consideradas no processamento.

O vetor dos valores observados (ou das observações) se escreve como:

$$L_b = \begin{bmatrix} X_{t_1} \\ X_{t_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ X_{t_n} \end{bmatrix}, \tag{4.7}$$

sendo composto pelos valores das coordenadas de cada solução diária obtida no processamento, e a seguinte expressão representa o vetor dos resíduos:

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

onde v_i ($i = 1, 2, \dots, n$) representa o resíduo de cada observação.

Como toda observação possui um resíduo, o vetor dos valores observados ajustados (L_a) é, então, denotado por:

$$L_a = L_b + V. \quad (4.9)$$

Analogamente, o vetor dos parâmetros ajustados (X_a) é expresso como:

$$X_a = X_0 + X, \quad (4.10)$$

onde X_0 é o vetor cujas componentes são os valores aproximados dos parâmetros. O termo X representa o vetor correção dos valores aproximados dos parâmetros.

Os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático:

$$L_a = F(X_a). \quad (4.11)$$

Neste caso, diz-se que o ajustamento se processa pelo método paramétrico (GEMAEL, 1994, p. 117).

O modelo (que já é linear) do método dos parâmetros pode ser escrito, em linguagem matricial, da seguinte forma:

$${}_nV_1 = {}_nA_{u \ u} X_1 + {}_nL_1, \quad (4.12)$$

onde os termos subscritos indicam a ordem de cada matriz, sendo n o número de observações (equações) e u o número de parâmetros a serem determinados. O termo A é a matriz das derivadas parciais dos parâmetros, e L a diferença entre a função dos parâmetros aproximados, $F(X_0)$ ou L_0 , e o vetor dos valores observados, L_b . Ou seja:

$$L = L_0 - L_b. \quad (4.13)$$

O vetor L_0 é obtido pela aplicação, na função F , do parâmetro aproximado X_0 , o qual, nada mais é do que o vetor das coordenadas aproximadas da estação que deverá ser processada.

No contexto desta pesquisa, considerando-se uma estação em particular, o número de parâmetros a serem determinados é $u = 6$, isto é, (x, y, z, v_x, v_y, v_z) , obtendo-se a seguinte matriz A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (t-t_1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_1) \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & (t-t_n) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t-t_n) \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

No Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), não comparece correlação entre as estações, razão pela qual o desenvolvimento teórico se restringiu a apenas uma estação.

A matriz dos pesos (P) das observações (L_b) é calculada a partir da seguinte expressão:

$$P = (\sigma_0)^2 (\Sigma_{L_b})^{-1}, \quad (4.15)$$

onde $(\sigma_0)^2$ é a variância a priori e $(\Sigma_{L_b})^{-1}$ a inversa da MVC das observações.

Determinada a matriz A , as equações normais²⁷ do ajustamento podem ser obtidas pelas seguintes expressões matriciais (1 estação, n épocas):

$$N = A^T P A = \begin{bmatrix} n & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n) & 0 & 0 \\ 0 & n & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n) & 0 \\ 0 & 0 & n & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n) \\ \sum_{i=1}^n (t - t_n) & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n)^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n) & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n)^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n) & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n (t - t_n)^2 \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

$$U = A^T P L = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_{t_n} \\ \sum_{i=1}^n y_{t_n} \\ \sum_{i=1}^n z_{t_n} \\ \sum_{i=1}^n (x_{t_n} (t - t_n)) \\ \sum_{i=1}^n (y_{t_n} (t - t_n)) \\ \sum_{i=1}^n (z_{t_n} (t - t_n)) \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

²⁷ Por comodidade, as equações normais são indicadas, considerando-se $P = I$ (Matriz Identidade) e $(\sigma_0)^2 = 1$.

Utilizando, então, as equações normais (4.16) e (4.17) para compor o vetor correção X (equação 4.10), cujas componentes convertem os parâmetros aproximados (X_0) em ajustados (X_a), obtém-se a seguinte relação matricial:

$$X = -N^{-1}U. \quad (4.18)$$

Em suma, aplicando-se o MMQ (Método dos Mínimos Quadrados), os valores dos componentes dos vetores X_t e V_t são estimados, bem como suas respectivas MVCs, as quais, por sua vez, são um indicativo da qualidade do processamento (GEMAEL, 1994, p. 72).

A expressão que fornece a Matriz Variância Covariância do vetor correção dos parâmetros é denotada por:

$$\Sigma_x = (\hat{\sigma}_0)^2 N^{-1}, \quad (4.19)$$

onde

$$(\hat{\sigma}_0)^2 = \frac{V^T P V}{n - u}, \quad (4.20)$$

sendo n o número de observações e u o número de parâmetros.

A equação (4.19) demonstra que o cálculo da matriz inversa de N já permite realizar algumas análises sobre o comportamento da MVC dos parâmetros, ou seja, da precisão dos mesmos.

Por fim, foram geradas soluções finais de coordenadas e velocidades referentes às 21 estações, em termos de suas componentes cartesianas, adotando-se como referência a época 19 de março de 2000 (2000,2).

Como consequência, foram obtidas também as velocidades das estações em termos de suas componentes (N , E , u), no sistema geodésico local.

Vale ressaltar que, para todos os casos, foram calculados os respectivos desvios-padrão formais das grandezas, os quais, por sua vez, são indicadores aleatórios da precisão obtida para as coordenadas e velocidades, tendo sido obtidos a partir das MVCs calculadas no ajustamento.

Uma menção completa, bem como a apresentação de todos os resultados e análises obtidos, são feitas no capítulo 5. Na seção (5.3), em particular, é feita uma análise mais detalhada sobre a influência da escolha da época de referência na precisão das coordenadas (ver também o Apêndice A).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados a serem analisados neste capítulo são, basicamente, os valores obtidos para as coordenadas e velocidades, bem como para suas respectivas precisões, no que diz respeito às 21 estações GPS envolvidas na pesquisa.

A análise de precisão é feita com base em dois métodos:

- cálculo dos desvios-padrão formais das coordenadas e velocidades;
- cálculo da repetibilidade das coordenadas estimadas para as estações.

O desvio-padrão formal dos parâmetros é obtido a partir da MVC dos parâmetros, calculada no processamento a partir da técnica de Filtro de Kalman. Trata-se de uma expressão que, normalmente, proporciona valores otimistas para a qualidade dos parâmetros (MONICO, 2000a).

A repetibilidade diária (*REP*) permite uma estimativa de precisão para as coordenadas das estações ou componentes das linhas de base. Trata-se do erro médio quadrático ponderado que é dado pela expressão (BLEWITT, 1989):

$$REP = \left(\frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(R_i - \bar{R})^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \right)^{1/2}, \quad (5.1)$$

onde n é o número de dias de ocupação, R_i e σ_i são a estimativa e o erro formal (desvio-padrão) das coordenadas para o i -ésimo dia, e $\bar{R}$ é a média ponderada das coordenadas da estação considerada.

Além disso, a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles fornecidos por outras fontes (ITRFs e modelos geofísicos) permite avaliar a acurácia da solução obtida. Para tanto, são calculadas algumas

quantidades estatísticas, tais como: o erro médio ($erro_{médio}$), o desvio-padrão (σ) e o erro médio quadrático (EMQ).

O erro médio é dado pela expressão

$$erro_{médio} = \frac{\sum discrep}{n}, \quad (5.2)$$

onde, para o caso particular das coordenadas cartesianas,

$$discrep = [(X, Y, Z)_{solução\ obtida} - (X, Y, Z)_{outras\ fontes}], \quad (5.3)$$

e n é o número total de discrepâncias calculadas. Convém observar que a expressão (5.3) pode assumir outras formas, casos em que são calculadas as discrepâncias entre as velocidades das diferentes soluções, bem como entre coordenadas ou velocidades em outro sistema de referência (por exemplo, o geodésico local).

O desvio-padrão pode ser escrito como (VUOLO, 1992, p. 35)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (discrep - erro_{médio})^2}{n - 1}}. \quad (5.4)$$

Utilizando as expressões (5.2) e (5.4), pode-se obter o erro médio quadrático, da seguinte forma:

$$EMQ = \sqrt{(erro_{médio})^2 + (\sigma)^2}. \quad (5.5)$$

A partir destas quantidades estatísticas, pode-se então avaliar a acurácia das coordenadas e velocidades obtidas, ao compará-las com as soluções fornecidas pelos ITRFs e pelos modelos NNR-NUVEL 1A e APKIM 2000.

5.1 Análise das Soluções Finais Obtidas com o *Software* GOA II

A Tabela 5.1 apresenta as coordenadas e respectivos desvios-padrão das 21 estações, em termos de suas componentes cartesianas, para a época $t = 2000,2$.

TABELA 5.1 – Coordenadas cartesianas das estações e respectivos desvios-padrão

ESTAÇÃO	X (m)	σ_X (m)	Y (m)	σ_Y (m)	Z (m)	σ_Z (m)
BOMJ	4510195,8486	0,0006	-4268322,3202	0,0006	-1453035,3294	0,0002
BRAZ	4115014,0910	0,0005	-4550641,5360	0,0005	-1741444,0439	0,0002
CRAT	4888826,1064	0,1001	-4017957,5945	0,0800	-798309,0139	0,0200
CUIB	3430711,4108	0,0004	-5099641,5585	0,0004	-1699432,9581	0,0002
FORT	4985386,6108	0,0018	-3954998,5958	0,0015	-428426,4614	0,0004
IMPZ	4289656,4515	0,0006	-4680884,9404	0,0007	-606347,5754	0,0002
MANA	3179009,3804	0,0008	-5518662,1225	0,0010	-344401,8474	0,0002
PARA	3763751,6518	0,0004	-4365113,7912	0,0004	-2724404,7189	0,0002
POAL	3467519,4088	0,0004	-4300378,5244	0,0004	-3177517,7566	0,0003
RECF	5176588,6542	0,0006	-3618162,1479	0,0005	-887363,9495	0,0002
SALV	4863495,7319	0,0006	-3870312,3403	0,0005	-1426347,8446	0,0002
UEPP	3687624,3185	0,0004	-4620818,5947	0,0004	-2386880,3705	0,0002
VICO	4373283,3193	0,0005	-4059639,0388	0,0004	-2246959,7560	0,0002
ASC1	6118526,0696	0,0007	-1572344,7066	0,0003	-876451,1552	0,0002
EISL	-1884951,5483	0,0005	-5357595,9298	0,0007	-2892890,5463	0,0004
FAIR	-2281621,4930	0,0004	-1453595,8016	0,0003	5756961,8559	0,0007
GOLD	-2353614,2277	0,0005	-4641385,3640	0,0007	3676976,4181	0,0005
LPGS	2780102,9859	0,0004	-4437418,8819	0,0005	-3629404,5810	0,0004
PIN1	-2369510,5351	0,0002	-4761207,0865	0,0004	3511396,1948	0,0002
SANT	1769693,4141	0,0003	-5044574,1539	0,0005	-3468321,0320	0,0003
SUTH	5041274,8193	0,0005	1916054,0624	0,0003	-3397076,0454	0,0003

Conforme mencionado anteriormente, a estação CRATO apresenta desvios-padrão discrepantes com relação aos das demais estações. Suspeita-se que isto se deva, principalmente, à pequena quantidade de épocas de dados processados desta estação, bem como ao afastamento temporal de tais épocas com relação à época de referência para obtenção das velocidades.

As velocidades e respectivos desvios-padrão, em termos das componentes cartesianas, são apresentados na Tabela 5.2.

TABELA 5.2 – Velocidades cartesianas das estações e respectivos desvios-padrão

ESTAÇÃO	V_X (m/ano)	σ_{V_X} (m/ano)	V_Y (m/ano)	σ_{V_Y} (m/ano)	V_Z (m/ano)	σ_{V_Z} (m/ano)
BOMJ	0,0056	0,0007	-0,0117	0,0007	0,0020	0,0003
BRAZ	0,0004	0,0005	-0,0055	0,0005	0,0062	0,0002
CRAT	-0,0567	0,0986	0,1479	0,0845	-0,0178	0,0255
CUIB	0,0050	0,0004	-0,0087	0,0005	0,0027	0,0002
FORT	-0,0053	0,0013	-0,0070	0,0011	0,0068	0,0003
IMPZ	-0,0065	0,0006	-0,0049	0,0006	0,0050	0,0002
MANA	0,0075	0,0006	-0,0117	0,0007	0,0028	0,0002
PARA	0,0061	0,0005	-0,0097	0,0005	0,0025	0,0003
POAL	0,0076	0,0006	-0,0100	0,0006	0,0006	0,0004
RECF	-0,0026	0,0010	-0,0027	0,0008	0,0119	0,0003
SALV	-0,0019	0,0011	-0,0001	0,0009	0,0112	0,0004
UEPP	0,0064	0,0004	-0,0101	0,0004	0,0032	0,0002
VICO	0,0069	0,0005	-0,0112	0,0004	0,0040	0,0002
ASC1	0,0038	0,0008	-0,0088	0,0004	0,0071	0,0002
EISL	0,0750	0,0004	-0,0161	0,0007	-0,0144	0,0004
FAIR	-0,0232	0,0004	-0,0068	0,0003	-0,0212	0,0007
GOLD	-0,0243	0,0006	0,0034	0,0007	-0,0121	0,0005
LPGS	0,0107	0,0004	-0,0144	0,0005	-0,0007	0,0004
PIN1	-0,0175	0,0003	0,0218	0,0004	0,0031	0,0003
SANT	0,0308	0,0004	-0,0139	0,0005	-0,0009	0,0003
SUTH	≈ 0	0,0005	0,0229	0,0003	0,0153	0,0003

Novamente, pode-se perceber a discrepância das velocidades obtidas para a estação CRATO com relação às das demais; no caso das componentes X e Z desta estação, os desvios-padrão das velocidades chegam a ser superiores às respectivas grandezas.

No intuito de ilustrar as precisões das coordenadas e velocidades apresentadas nas duas últimas tabelas, foram gerados gráficos indicativos dos desvios-padrão formais, ilustrados pelas Figuras 5.1 e 5.2. Por motivo de preservação da escala dos gráficos, a estação CRATO não foi incluída nas ilustrações, haja vista que sua presença exigiria um aumento dessa escala, o que acarretaria uma visualização quase impossível das precisões das outras estações.

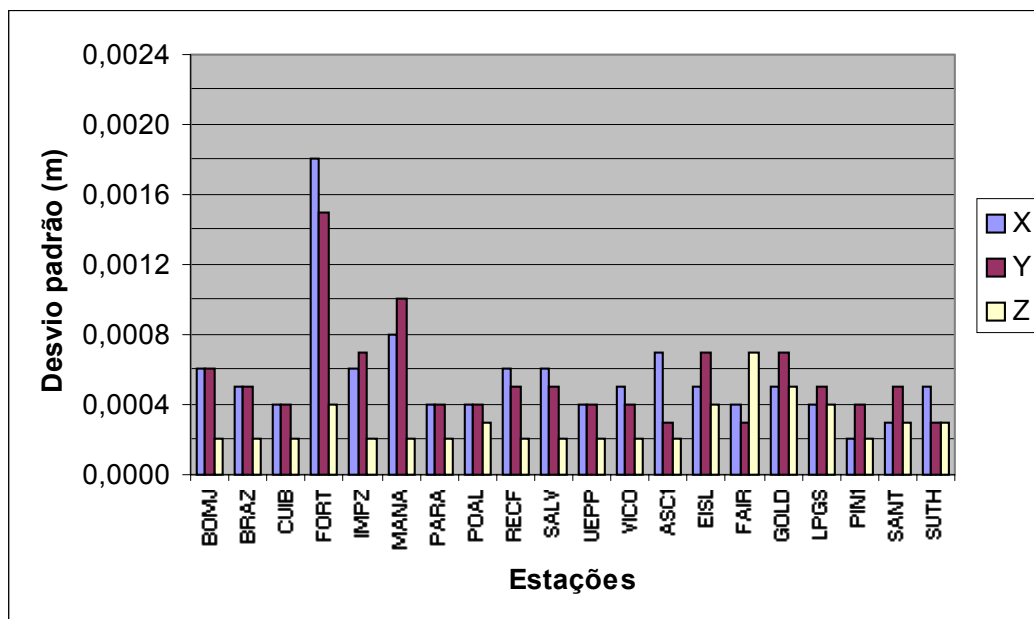


FIGURA 5.1 – Desvios-padrão das coordenadas, à época 19 de março de 2000 ($t = 2000,2$)

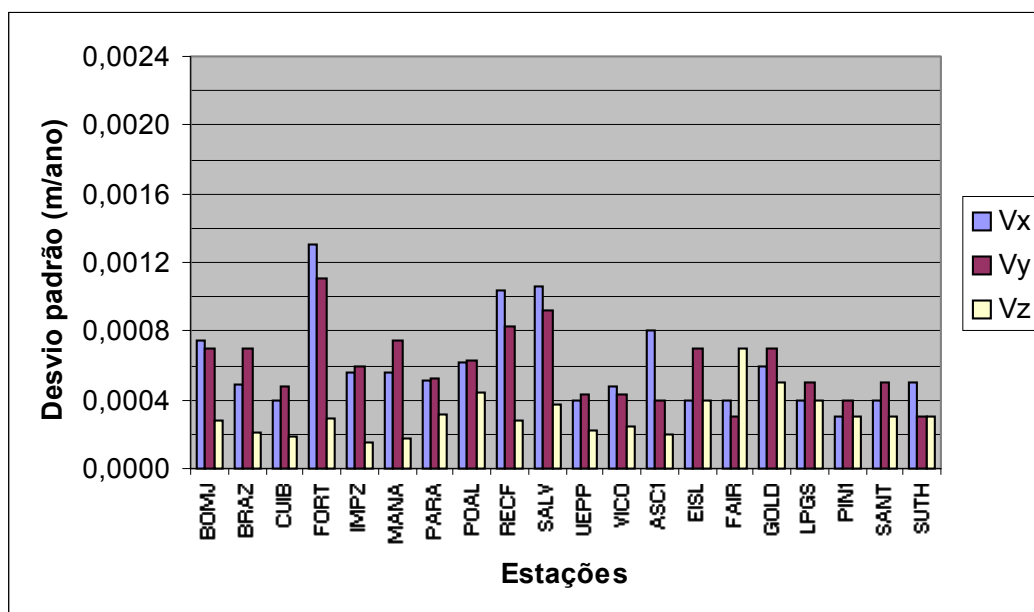


FIGURA 5.2 – Desvios-padrão das velocidades, à época 19 de março de 2000 ($t = 2000,2$)

De acordo com as Figuras 5.1 e 5.2, é possível notar que, para a maioria das estações, as componentes X e Y são as que fornecem piores resultados, apesar de bastante otimistas.

Em princípio, os desvios-padrão obtidos para as coordenadas e velocidades parecem ser influenciados principalmente pela maior ou menor quantidade de dados processados para cada estação. Mas também é possível que as estações Fortaleza (FORT) e Manaus (MANA) sofram maior influência da atividade ionosférica, haja vista estarem mais próximas do Equador, o que justificaria desvios-padrão mais elevados para essas duas estações (Figura 5.1). Vale também ressaltar que as condições climáticas da região amazônica são bastante diferenciadas daquelas observadas nas demais regiões do Brasil, de modo que possíveis efeitos de refração troposférica poderiam estar degradando a precisão das coordenadas da estação Manaus. Entretanto, este é um tópico que merece estudos mais detalhados, haja vista que as condições climáticas de regiões afastadas do território nacional devem ser claramente definidas, para que a comparação entre a estação Manaus e as demais consideradas na presente pesquisa seja plausível.

A análise da Figura 5.2 permite verificar a semelhança do comportamento das precisões formais das velocidades com aquele observado no gráfico da Figura 5.1. Em ambos os casos, as componentes X e Y são as que fornecem os piores resultados, ao passo que a componente na direção Z fornece os melhores.

As precisões formais das coordenadas das estações, em termos de suas componentes N (Norte), E (Leste) e u (altura) do sistema geodésico local, estão indicadas no gráfico da Figura 5.3 e foram calculadas a partir de um aplicativo desenvolvido no *software* MATLAB (MATrix LABoratory). Tais precisões foram obtidas com base no modelo denotado pela equação (3.4), a partir da MVC das coordenadas cartesianas, utilizando a lei de propagação de covariâncias:

$$\begin{bmatrix} \sigma_E^2 & \sigma_{EN} & \sigma_{Eu} \\ \sigma_{NE} & \sigma_N^2 & \sigma_{Nu} \\ \sigma_{uE} & \sigma_{uN} & \sigma_u^2 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{ZX} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix} [R]^T, \quad (5.6)$$

onde σ_X^2 , σ_Y^2 e σ_Z^2 representam as variâncias e σ_{XY} , σ_{XZ} e σ_{YZ} , as covariâncias. Note-se que, daqui por diante, a estação CRATO não comparece mais nas ilustrações, em razão dos valores discrepantes apresentados por essa estação.

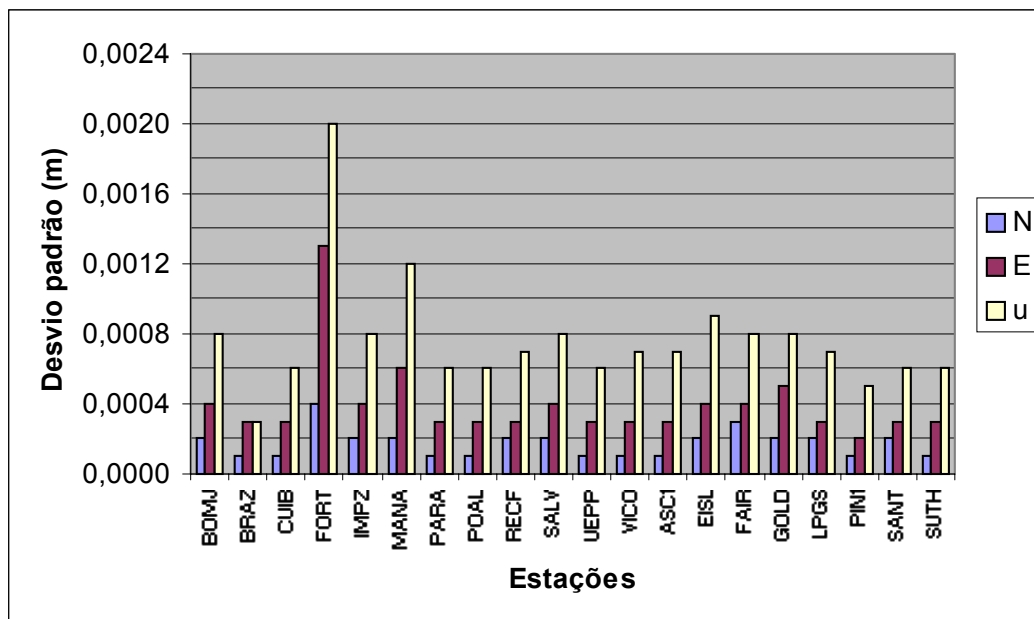


FIGURA 5.3 – Desvios-padrão das coordenadas (N, E, u) das estações

De acordo com a Figura 5.3, nota-se que a componente altimétrica (u) do sistema geodésico local é que fornece os piores resultados, ao passo que os melhores são apresentados pela componente na direção Norte (N), seguida pela componente Este (E). Por outro lado, a componente N é melhor que a E . Isto se deve ao fato de não terem sido solucionadas as ambigüidades.

Os valores obtidos para a repetibilidade das coordenadas (N , E , u) das estações são ilustrados na Figura 5.4, e foram calculados a partir da equação (5.1).

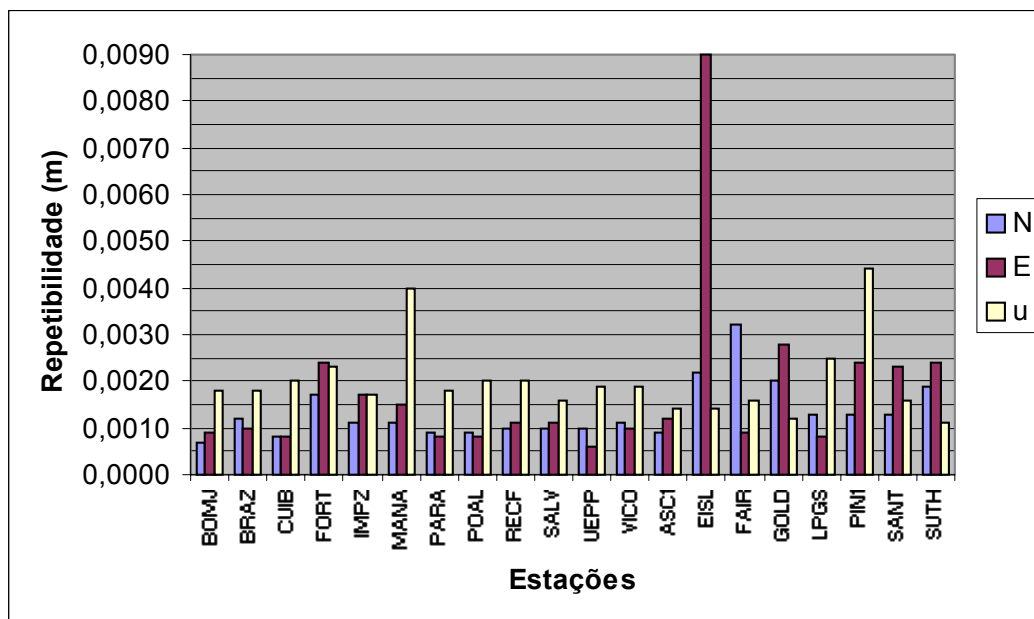


FIGURA 5.4 – Repetibilidade das coordenadas (N, E, u) das estações

De acordo com a Figura 5.4, verifica-se que, para a maioria das estações, a componente vertical (u) das repetibilidades apresenta-se 2 ou 3 vezes maior (pior) que a respectiva componente vertical dos desvios-padrão (Figura 5.3). Para a estação PIN1, a repetibilidade da componente u chega a ser uma ordem de grandeza maior que o respectivo desvio-padrão, ou seja, dez vezes pior.

No que diz respeito à repetibilidade da componente E , esta se apresenta em torno de 3 a 4 vezes pior, para a maioria das estações, embora, para alguns casos, os valores sejam 10 ou até 20 vezes piores, como é o caso da estação EISL. Suspeita-se que o comparecimento deste valor tão elevado de repetibilidade se dê em virtude da grande ocorrência de perdas de ciclos observada na maioria dos arquivos de dados desta estação, principalmente nos arquivos cujas épocas estão próximas à época de referência estabelecida.

Quanto à componente N , a maioria das estações apresenta valores de repetibilidade aproximadamente 10 vezes piores que os respectivos desvios-padrão. De qualquer forma, a componente u , na maioria dos casos, é a que apresenta os piores resultados.

Na Tabela 5.3, são apresentadas as velocidades das estações e seus respectivos desvios-padrão, em termos das componentes N , E e u . Assim, analogamente à equação (5.6), aplica-se a propagação de covariâncias, obtendo-se a seguinte expressão para o cálculo dos desvios-padrão das velocidades:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{V_E}^2 & \sigma_{V_E V_N} & \sigma_{V_E V_u} \\ \sigma_{V_N V_E} & \sigma_{V_N}^2 & \sigma_{V_N V_u} \\ \sigma_{V_u V_E} & \sigma_{V_u V_N} & \sigma_{V_u}^2 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \sigma_{V_X}^2 & \sigma_{V_X V_Y} & \sigma_{V_X V_Z} \\ \sigma_{V_Y V_X} & \sigma_{V_Y}^2 & \sigma_{V_Y V_Z} \\ \sigma_{V_Z V_X} & \sigma_{V_Z V_Y} & \sigma_{V_Z}^2 \end{bmatrix} [R]^T, \quad (5.7)$$

cujos elementos das matrizes são definidos de forma análoga aos da equação da MVC das coordenadas (equação (5.6)).

Extraindo a raiz quadrada das variâncias das componentes V_E , V_N , V_u , obtêm-se os desvios-padrão das respectivas componentes.

TABELA 5.3 – Velocidades e respectivos desvios-padrão em termos das componentes N, E, u

ESTAÇÃO	V_N (m/ano)	σ_{V_N} (m/ano)	V_E (m/ano)	σ_{V_E} (m/ano)	V_u (m/ano)	σ_{V_u} (m/ano)
BOMJ	0,0047	0,0003	-0,0046	0,0007	0,0113	0,0007
BRAZ	0,0007	0,0002	-0,0034	0,0005	0,0024	0,0005
CRAT	-0,0350	0,0278	0,0782	0,0904	-0,134	0,0925
CUIB	0,0053	0,0002	-0,0007	0,0004	0,0090	0,0004
FORT	0,0068	0,0003	-0,0087	0,0012	-0,0003	0,0012
IMPZ	0,0049	0,0001	-0,0081	0,0005	-0,0012	0,0005
MANA	0,0035	0,0002	0,0007	0,0006	0,0137	0,0007
PARA	0,0072	0,0003	-0,0017	0,0005	0,0091	0,0005
POAL	0,0068	0,0005	-0,0004	0,0006	0,0106	0,0006
RECF	0,0116	0,0003	-0,0036	0,0007	-0,0022	0,0005
SALV	0,0106	0,0004	-0,0012	0,0009	-0,0039	0,0010
UEPP	0,0074	0,0002	-0,0013	0,0004	0,0098	0,0004
VICO	0,0082	0,0003	-0,0035	0,0004	0,0104	0,0004
ASC1	0,0078	0,0002	-0,0076	0,0004	0,0048	0,0008
EISL	-0,0172	0,0004	0,0762	0,0004	-0,0020	0,0006
FAIR	-0,0301	0,0004	-0,0067	0,0003	-0,0094	0,0006
GOLD	-0,0145	0,0005	-0,0232	0,0006	-0,0006	0,0006
LPGS	0,0097	0,0004	0,0014	0,0004	0,0151	0,0004
PIN1	0,0090	0,0003	-0,0254	0,0003	-0,0080	0,0003
SANT	0,0135	0,0004	0,0244	0,0004	0,0190	0,0004
SUTH	0,0174	0,0003	0,0214	0,0003	-0,0013	0,0004

Mais uma vez, a discrepância dos valores da estação CRATO com relação aos demais se faz presente, agora na Tabela 5.3. A Figura 5.5

apresenta um gráfico ilustrativo das precisões formais das velocidades das estações no sistema geodésico local.

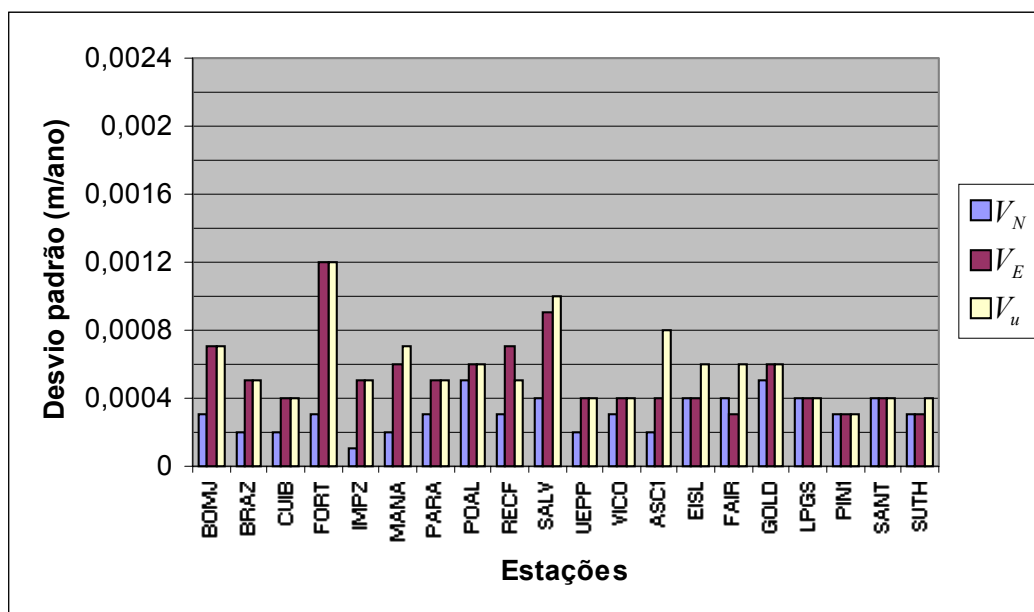


FIGURA 5.5 – Desvios-padrão das velocidades (V_N , V_E , V_u) das estações

A partir da Figura 5.5, pode-se perceber, mais uma vez, que os piores resultados estão relacionados à componente vertical (u), em contraposição aos melhores resultados da componente vertical (Z) das velocidades cartesianas, muito embora a precisão da componente E também esteja deteriorada. Os melhores resultados são fornecidos pela componente N , com desvios que não ultrapassam 0,5 mm/ano.

5.2 Comparação com Soluções ITRF e Modelos Geofísicos

Com o objetivo de comparar as coordenadas cartesianas obtidas neste trabalho (em ITRF 97, época 19 de março de 2000 ($t = 2000,2$)) com aquelas fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000, foram calculadas as discrepâncias entre as mesmas. A Tabela 5.4 apresenta tais discrepâncias, bem como o erro médio, o desvio-padrão e o erro médio quadrático. As soluções ITRFyy (consultar Apêndices B1 e B2) foram obtidas a partir do endereço

eletrônico <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/solutions.html> (acessado em 28 de junho de 2002) e suas coordenadas foram atualizadas à época de referência ($t = 2000,2$) adotada nesta pesquisa.

TABELA 5.4 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final do trabalho e as fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000

Estação	$(X,Y,Z)_{\text{solução final}} - (X,Y,Z)_{\text{ITRF 97}}$			$(X,Y,Z)_{\text{solução final}} - (X,Y,Z)_{\text{ITRF 2000}}$		
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
BOMJ				-0,0056	0,0068	-0,0224
BRAZ	0,0180	-0,0070	0,0081	0,0020	0,0160	-0,0199
CRAT						
CUIB				-0,0002	0,0105	-0,0171
FORT	-0,0272	0,0032	0,0092	-0,0122	0,0052	-0,0181
IMPZ				-0,0025	0,0016	-0,0176
MANA				0,0094	-0,0035	-0,0252
PARA				-0,0012	0,0098	-0,0159
POAL						
RECF						
SALV						
UEPP				0,0035	0,0113	-0,0195
VICO				0,0063	0,0062	-0,0200
ASC1	-0,0004	-0,0046	0,0107	0,0006	0,0064	-0,0218
EISL	0,0017	0,0162	0,0117	0,0077	0,0082	-0,0203
FAIR	0,0080	0,0024	-0,0131	0,0090	0,0034	-0,0241
GOLD	-0,0017	0,0120	-0,0049	0,0043	0,0050	-0,0199
LPGS	0,0119	-0,0079	0	0,0089	0,0041	-0,0260
PIN1	0,0199	0,0215	0,0078			
SANT	-0,0009	0,0151	0,0170	0,0061	0,0131	-0,0200
SUTH	-0,0047	0,0134	0,0146	-0,0067	0,0074	-0,0184
Erro Médio	0,0025	0,0064	0,0061	0,0025	0,0070	-0,0204
Desvio Padrão	0,0134	0,0106	0,0093	0,0060	0,0047	0,0029
EMQ	0,0136	0,0124	0,0111	0,0065	0,0084	0,0206

Nota-se, pela Tabela 5.4, que, apesar de algumas estações apresentarem componentes mais discrepantes, o erro médio quadrático (EMQ) com relação ao ITRF 97 indica que as discrepâncias das três componentes não atingem 14 mm. Quanto às discrepâncias com relação ao ITRF 2000, o EMQ se apresentou mais elevado na componente Z, suspeitando-se da existência de erro sistemático em tal componente. Observe que todos os valores são negativos. Tal comportamento pode ser observado também na componente Y, para a qual todos os valores são positivos (exceto na estação MANA). Nota-se também que os desvios-padrão das discrepâncias com relação ao ITRF 2000 são menores que os das discrepâncias com relação ao ITRF97. As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram tais discrepâncias.

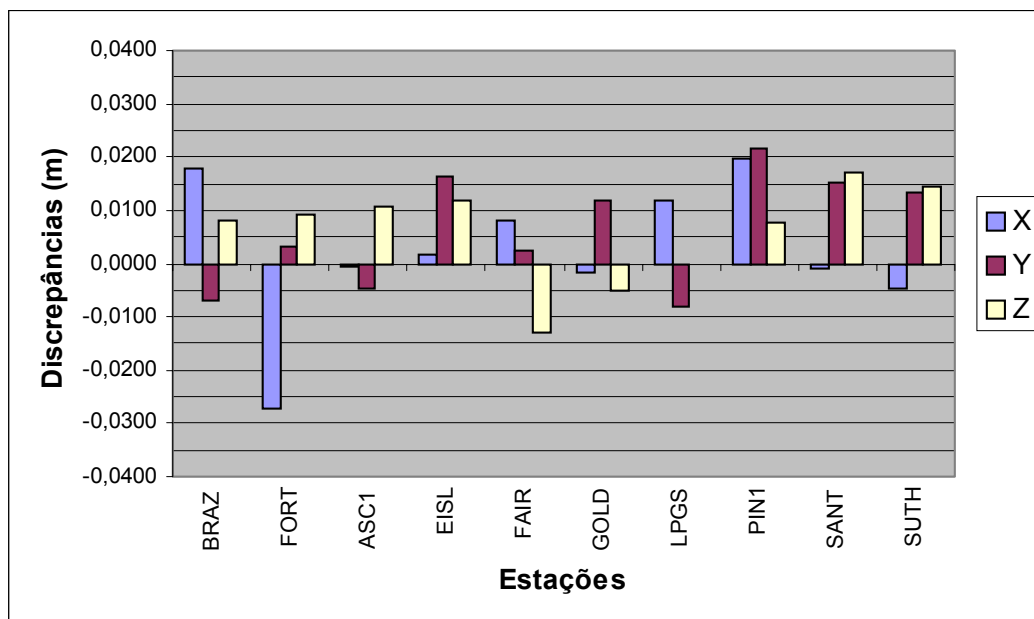


FIGURA 5.6 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final e as do ITRF 97

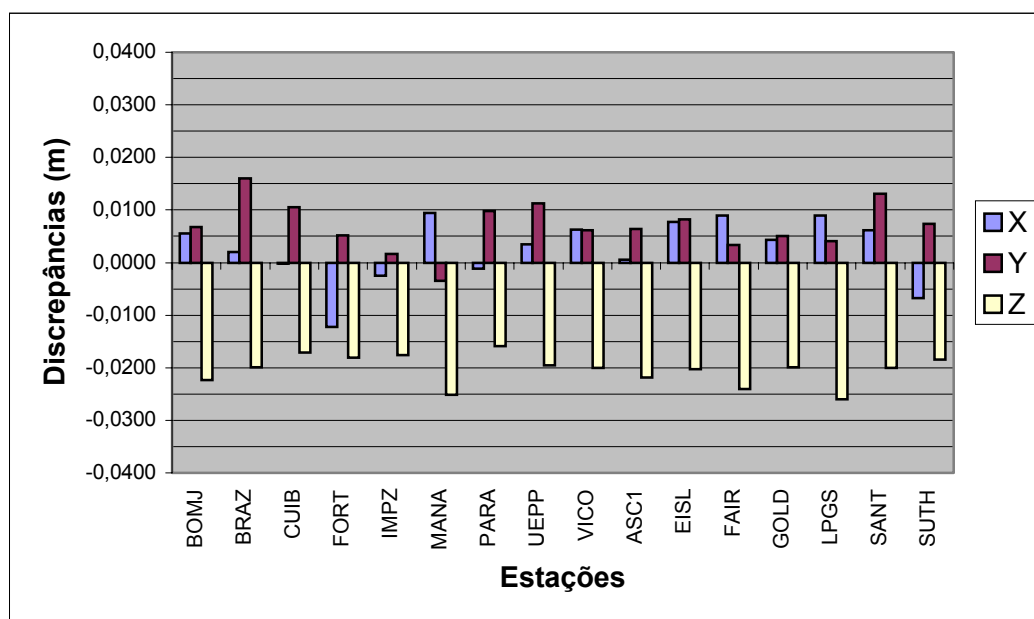


FIGURA 5.7 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final e as do ITRF 2000

Em razão das discrepâncias sistematicamente mais elevadas observadas na componente Z das coordenadas da solução final com relação ao ITRF 2000, decidiu-se investigar o motivo de tal ocorrência e a possibilidade de

corrigir tal efeito. Como a solução final deste trabalho está referenciada ao ITRF 97 (época 2000,2), suspeitou-se que o comportamento sistemático observado na Figura 5.7 poderia estar relacionado à incompatibilidade entre o ITRF 97 e o ITRF 2000. De fato, existe uma pequena diferença entre eles, em razão dos parâmetros de translação, rotação e um fator de escala que os conecta. Para maiores detalhes desses parâmetros, consultar Altamimi et al. (2002, p.35).

Dessa forma, optou-se por representar as coordenadas originais do ITRF 2000 (época 1997,0) no ITRF 97 (época 1997,0), considerando os parâmetros de transformação entre esses dois referenciais. Em seguida, tais coordenadas foram atualizadas à mesma época de referência da solução deste trabalho, possibilitando a comparação desta última com uma solução compatível, ou seja, referenciada ao ITRF 97 (época 2000,2).

A transformação de um vetor de coordenadas X_1 , expresso no ITRF 2000 (1997,0), em um vetor de coordenadas X_2 , expresso no ITRF 97 (1997,0), é dado por (ALTAMIMI et al, 2002, p. 22):

$$X_2 = X_1 + T + D X_1 + R X_1, \quad (5.8)$$

onde T , R e D são, respectivamente, as 3 translações, 3 rotações (em torno dos eixos cartesianos) e fator de escala do ITRF 2000 para o ITRF97, sendo

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad R = \begin{bmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Da mesma forma que as coordenadas, as velocidades também podem ser obtidas, a partir da expressão que considera a taxa de variação de cada um dos parâmetros da equação (5.8), sendo dada por:

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D} X_1 + \dot{R} X_1, \quad (5.9)$$

onde $\dot{X}_1$ e $\dot{X}_2$ são, respectivamente, as taxas de variação das coordenadas no ITRF 2000 e ITRF 97, e $\dot{T}$, $\dot{R}$ e $\dot{D}$, as taxas de variação dos parâmetros vistos na equação (5.8).

Assim, a atualização das coordenadas referenciadas ao ITRF 97 (1997,0) para o ITRF 97 (época 2000,2), foi efetuada, utilizando-se a seguinte expressão (ALTAMIMI et al., 2002, p. 15):

$$X_{ITRF97(2000,2)} = X_2 + \dot{X}_2 (2000,2 - 1997,0), \quad (5.10)$$

onde $X_{ITRF97(2000,2)}$ é o vetor de coordenadas expressas em ITRF 97 e atualizadas à época 2000,2. X_2 e $\dot{X}_2$ são definidos como anteriormente.

Utilizando, então, as coordenadas transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97 e atualizadas à época 2000,2, elaborou-se a Tabela 5.5, que indica as novas discrepâncias obtidas com relação às coordenadas da solução final.

TABELA 5.5 – Discrepâncias entre as coordenadas cartesianas da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97 (2000,2)

Estação	(X,Y,Z) _{solução final} – (X,Y,Z) _{Transformação de ITRF 2000 (1997,0) para ITRF 97 (2000,2)}		
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
BOMJ	-0,0059	0,0071	0,0016
BRAZ	-0,0083	0,0160	0,0050
CRAT			
CUIB	-0,0092	0,0115	0,0069
FORT	-0,0232	0,0052	0,0052
IMPZ	-0,0135	0,0016	0,0059
MANA	0,0004	-0,0015	-0,0019
PARA	-0,0112	0,0098	0,0091
POAL			
RECF			
SALV			
UEPP	-0,0065	0,0113	0,0055
VICO	-0,0047	0,0062	0,0050
ASC1	-0,0114	0,0034	0,0020
EISL	0,0007	0,0092	0,0047
FAIR	0,0040	0,0004	-0,0061
GOLD	-0,0027	0,0060	-0,0005
LPGS	-0,0016	0,0037	0,0007
PIN1			
SANT	-0,0033	0,0131	0,0070
SUTH	-0,0177	-0,0001	0,0085
Erro Médio	-0,0071	0,0064	0,0037
Desvio Padrão	0,0071	0,0051	0,0041
EMQ	0,0100	0,0082	0,0055

A Tabela 5.5 mostra que, após a transformação e atualização das coordenadas no ITRF 2000 para o novo referencial (ITRF 97, época 2000,2), o EMQ das discrepâncias não ultrapassa 1 cm, deixando de comparecer o efeito sistemático ora observado na componente Z das discrepâncias da Tabela 5.4.

A Figura 5.8 ilustra as novas discrepâncias observadas na Tabela 5.5.

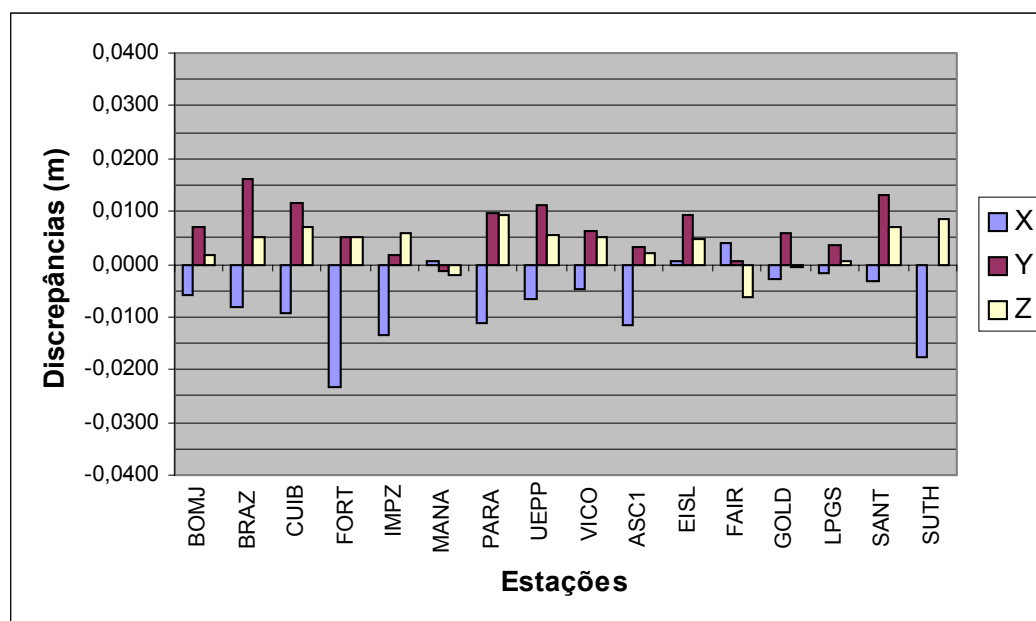


FIGURA 5.8 – Discrepâncias entre as coordenadas da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97 (2000,2)

Analogamente ao caso das coordenadas, a Tabela 5.6 indica as discrepâncias entre as velocidades da solução deste trabalho e as dos ITRFs utilizados. Os valores dessas velocidades encontram-se no Apêndice C1 e as discrepâncias entre as velocidades fornecidas pelos ITRFs, no Apêndice C2.

A partir de agora, as tabelas que apresentam grandezas transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97 devem receber o subscrito $_{ITRF\ 2000/97}$, após o símbolo da grandeza.

TABELA 5.6 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000/97

Estação	$(V_x, V_y, V_z)_{\text{solução final}} - (V_x, V_y, V_z)_{\text{ITRF 97}}$			$(V_x, V_y, V_z)_{\text{solução final}} - (V_x, V_y, V_z)_{\text{ITRF 2000/97}}$		
	ΔV_x (m/a)	ΔV_y (m/a)	ΔV_z (m/a)	ΔV_x (m/a)	ΔV_y (m/a)	ΔV_z (m/a)
BOMJ				0,0083	-0,0050	-0,0105
BRAZ	0,0089	-0,0065	-0,0036	-0,0007	0,0012	-0,0037
CRAT						
CUIB				0,0035	-0,0016	-0,0071
FORT	-0,0047	-0,0023	-0,0030	-0,0046	-0,0023	-0,0038
IMPZ				0,0180	-0,0224	-0,0129
MANA				0,0107	-0,0166	-0,0101
PARA				0,0007	-0,0008	-0,0049
POAL						
RECF						
SALV						
UEPP				0,0045	-0,0016	-0,0068
VICO				0,0072	-0,0033	-0,0067
ASC1	0,0118	-0,0067	0,0005	0,0058	-0,0039	-0,0016
EISL	0,0105	0,0058	-0,0043	0,0109	0,0039	-0,0061
FAIR	-0,0006	-0,0022	-0,0111	-0,0011	-0,0024	-0,0110
GOLD	-0,0086	-0,0009	-0,0061	-0,0086	-0,0014	-0,0058
LPGS	0,0127	-0,0107	-0,0091	0,0077	-0,0067	-0,0078
PIN1	0,0078	0,0093	-0,0007			
SANT	0,0092	-0,0067	-0,0078	0,0082	-0,0073	-0,0104
SUTH	-0,0030	0,0088	0,0069	-0,0057	0,0033	0,0024
Erro Médio	0,0044	-0,0012	-0,0038	0,0041	-0,0042	-0,0067
Desvio Padrão	0,0078	0,0070	0,0052	0,0070	0,0068	0,0039
EMQ	0,0089	0,0071	0,0065	0,0081	0,0080	0,0077

A Tabela 5.6 mostra que o EMQ das discrepâncias, em ambas as comparações, não atinge 9 mm.

As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram as discrepâncias apresentadas na Tabela 5.6. Para tanto, são consideradas apenas as estações que se fazem presentes em pelo menos dois tipos de solução (Apêndice C1).

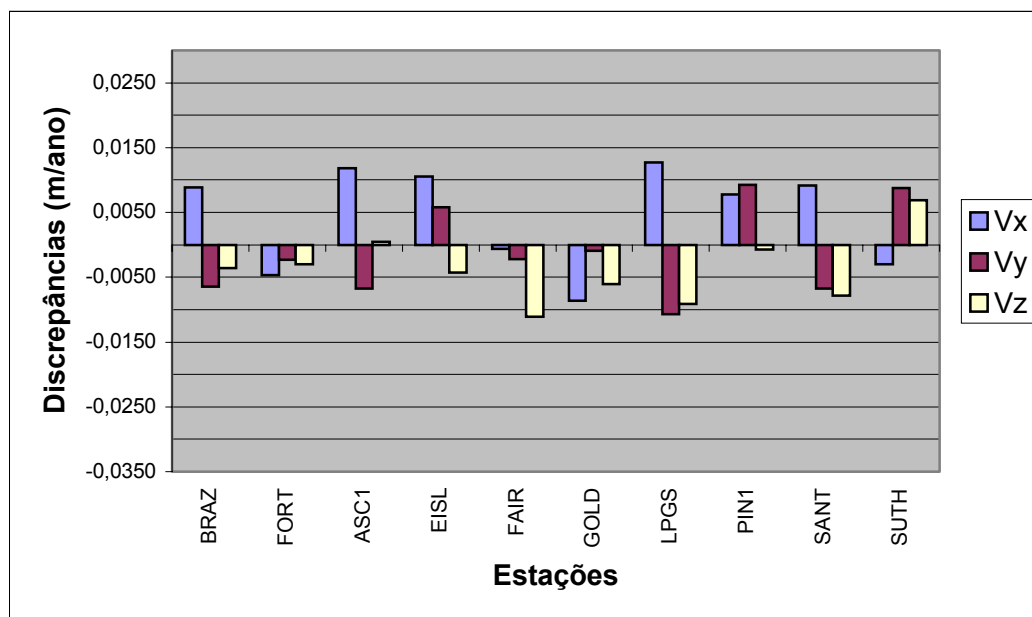


FIGURA 5.9 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as do ITRF 97

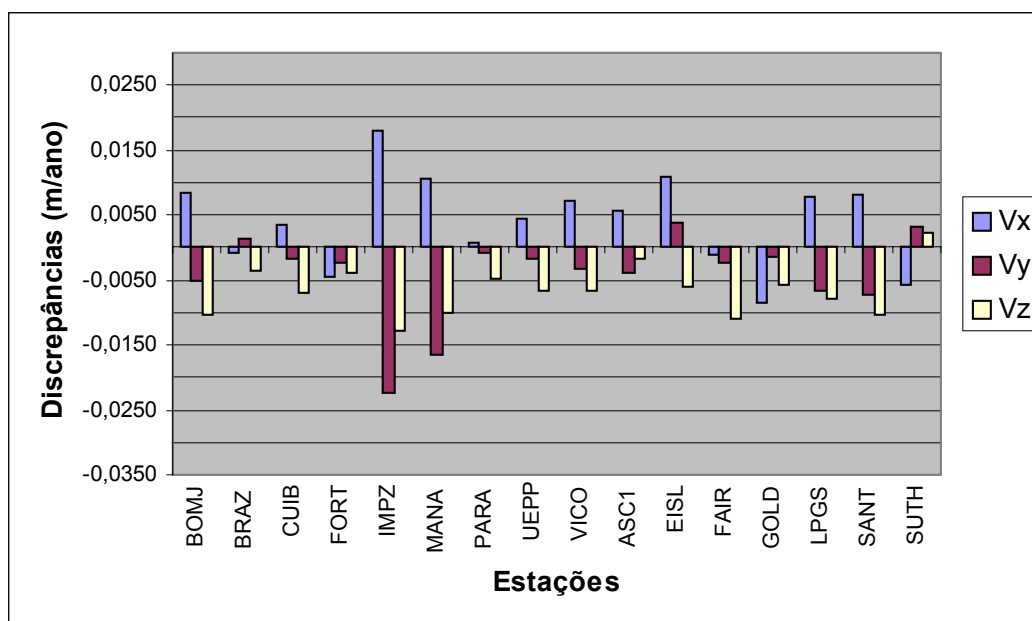


FIGURA 5.10 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97

Observa-se que, embora algumas estações apresentem componentes mais discrepantes, a maioria delas indica valores que não ultrapassam 1 cm, tanto com relação ao ITRF 97 quanto com o ITRF 2000. Com

relação ao ITRF 2000, as maiores discrepâncias comparecem nas estações Imperatriz (IMPZ) e Manaus (MANA); sabendo-se que as precisões dessas duas estações no ITRF 2000 apresentam valores de aproximadamente 2 cm/ano, é natural esperar tais discrepâncias para suas velocidades (consultar <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/solutions.html> (acessado em 2 de outubro de 2002)).

As outras duas comparações a serem feitas relacionam a solução final do presente trabalho e as soluções obtidas com os modelos geofísicos NNR-NUVEL 1A e o APKIM 2000. Para o cálculo das velocidades das estações a partir destes modelos, as velocidades angulares das placas, sobre as quais estão localizadas tais estações, tornam-se necessárias. Desta forma, a Tabela 5.7 apresenta as velocidades angulares de cada placa litosférica com relação aos eixos cartesianos X, Y e Z, segundo os modelos citados.

TABELA 5.7 – Velocidades angulares segundo os modelos NNR-NUVEL 1A e APKIM 2000

NOME DA PLACA	NNR-NUVEL 1 A			APKIM 2000		
	Ω_x (rad/Ma)	Ω_y (rad/Ma)	Ω_z (rad/Ma)	Ω_x (rad/Ma)	Ω_y (rad/Ma)	Ω_z (rad/Ma)
Pacífico	-0,001510	0,004840	-0,009970	-0,0014	0,0046	-0,0104
Cocos	-0,010425	-0,021605	0,010925			
Nazca	-0,001532	-0,008577	0,009609	-0,0010	-0,0079	0,0079
Caribenha	-0,000178	-0,003385	0,001581	-0,0007	-0,0022	0,0024
América do Sul	-0,001038	-0,001515	-0,000870	-0,0009	-0,0011	-0,0006
Antarctica	-0,000821	-0,001701	0,003706	-0,0012	-0,0015	0,0038
Índia	0,006670	0,000040	0,006790			
Austrália	0,007839	0,005124	0,006282	0,0071	0,0053	0,0061
África	0,000891	-0,003099	0,003922	0,0003	-0,0028	0,0037
Arábia	0,000891	-0,003099	0,003922	0,0049	-0,0008	0,0064
Eurásia	-0,000981	-0,002395	0,003153	-0,0003	-0,0024	0,0039
América do Norte	0,000258	-0,003599	-0,000153	0,0006	-0,0034	-0,0001
Juan de Fuca	0,005200	0,008610	-0,005820			
Filipina	0,010090	-0,007160	-0,009670			
Rivera	-0,009390	-0,030960	0,012050			
Scotia	-0,000410	-0,002660	-0,001270			

FONTE: Adaptada de DREWES (1998)

Utilizando as rotações cartesianas apresentadas na Tabela 5.7, pode-se então calcular as velocidades das estações, segundo estes dois modelos geofísicos, a partir da seguinte expressão (SOLER, 1998):

$$\vec{V}_A = \Omega_{P_i} \vec{X}_A \quad (5.11)$$

onde $\vec{V}_A$ é o vetor velocidade e $\vec{X}_A$ o vetor das coordenadas cartesianas de uma estação terrestre, ambos referenciados a um referencial A qualquer, e Ω_{P_i} é uma matriz antissimétrica dada por:

$$\Omega_{P_i} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_Z & \Omega_Y \\ \Omega_Z & 0 & -\Omega_X \\ -\Omega_Y & \Omega_X & 0 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

onde Ω_X , Ω_Y e Ω_Z são os valores das velocidades angulares com relação aos eixos X, Y e Z, respectivamente.

A Tabela 5.8 apresenta as discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final do trabalho e aquelas calculadas com os modelos geofísicos. As velocidades obtidas por estes dois modelos são apresentadas no Apêndice D1.

TABELA 5.8 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as fornecidas pelos modelos geofísicos

Estação	$(V_x, V_y, V_z)_{\text{solução final}} - (V_x, V_y, V_z)_{\text{NNR_NUVELIA}}$			$(V_x, V_y, V_z)_{\text{solução final}} - (V_x, V_y, V_z)_{\text{APKIM 2000}}$		
	ΔV_X (m/a)	ΔV_Y (m/a)	ΔV_Z (m/a)	ΔV_X (m/a)	ΔV_Y (m/a)	ΔV_Z (m/a)
BOMJ	0,0071	-0,0063	-0,0092	0,0065	-0,0077	-0,0068
BRAZ	0,0017	-0,0001	-0,0047	0,0012	-0,0015	-0,0024
CRAT						
CUIB	0,0069	-0,0040	-0,0078	0,0062	-0,0051	-0,0056
FORT	-0,0025	-0,0022	-0,0049	-0,0034	-0,0036	-0,0022
IMPZ	-0,0033	-0,0005	-0,0064	0,0149	0,0031	-0,0039
MANA	0,0118	-0,0086	-0,0077	0,0104	-0,0095	-0,0056
PARA	0,0058	-0,0036	-0,0077	0,0057	-0,0050	-0,0055
POAL	0,0066	-0,0037	-0,0091	0,0067	-0,0051	-0,0071
RECF	-0,0008	0,0027	0,0003	-0,0014	0,0012	0,0030
SALV	-0,0007	0,0056	-0,0002	-0,0012	0,0026	0,0024
UEPP	0,0068	-0,0044	-0,0072	0,0065	-0,0105	-0,0050
VICO	0,0070	-0,0051	-0,0068	0,0070	-0,0066	-0,0044
ASC1	0,0038	-0,0044	-0,0034	0,0038	-0,0044	-0,0010
EISL	-0,0013	0,0064	-0,0065	0,0098	0,0017	-0,0049
FAIR	-0,0022	-0,0057	-0,0126	-0,0035	-0,0036	-0,0126
GOLD	-0,0104	0,0040	-0,0025	-0,0114	0,0053	-0,0013
LPGS	0,0091	-0,0082	-0,0095	0,0094	-0,0095	-0,0077
PINI	0,0202	0,0069	-0,0258	0,0231	0,0063	-0,0247
SANT	0,0273	-0,0013	-0,0035	0,0274	-0,0022	-0,0021
SUTH	-0,0030	0,0049	-0,0017	-0,0024	0,0033	0,0009
Erro Médio	0,0045	-0,0014	-0,0068	0,0058	-0,0025	-0,0048
Desvio Padrão	0,0086	0,0049	0,0055	0,0090	0,0051	0,0059
EMQ	0,0097	0,0051	0,0088	0,0107	0,0057	0,0076

As Figuras 5.11 e 5.12 ilustram as discrepâncias entre as velocidades da solução final e as dos modelos NNR-NUVEL 1A e APKIM 2000.

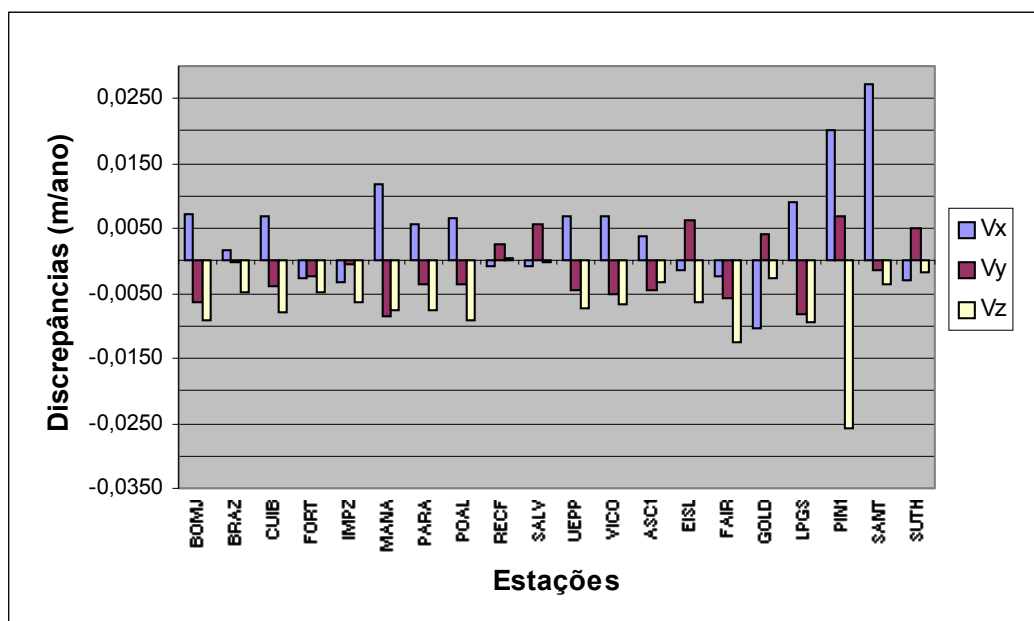


FIGURA 5.11 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as do modelo NNR-NUVEL 1A

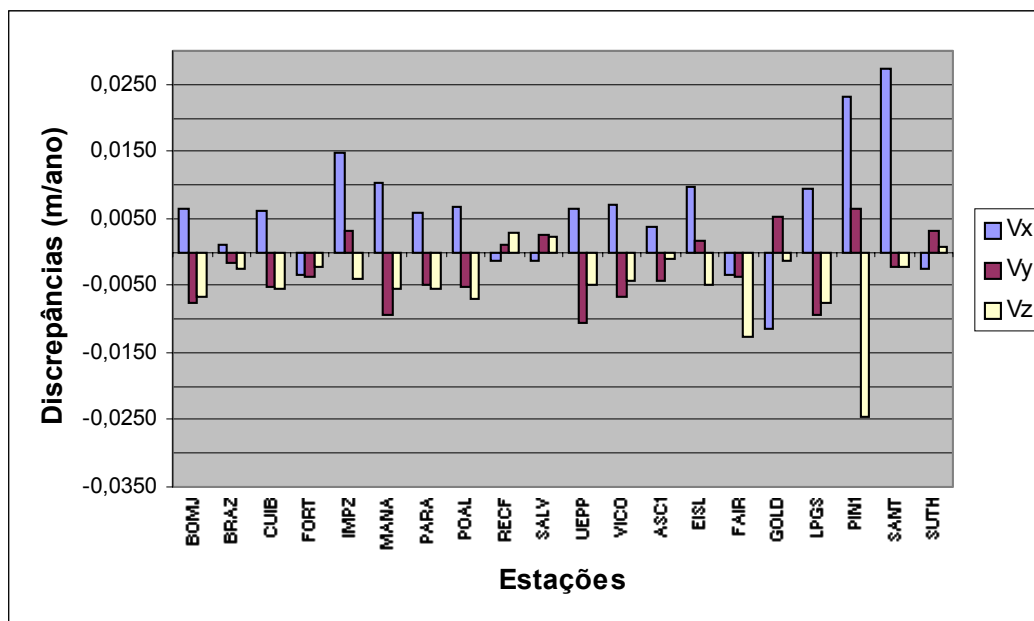


FIGURA 5.12 – Discrepâncias entre as velocidades cartesianas da solução final e as do modelo APKIM 2000

Nota-se, pelas Figuras 5.11 e 5.12, que os modelos geofísicos apresentam resultados semelhantes entre si, em termos da intensidade das discrepâncias, desconsiderando o sinal dos valores. Em ambas as comparações com os resultados da solução final, as três componentes cartesianas apresentam aproximadamente o mesmo comportamento quantitativo, com valores mais acentuados para as estações Pinyon Flats (PIN1) e Santiago (SANT). Seemüller et al. (2001) apresentaram um trabalho no qual obtiveram resultados semelhantes para a estação SANT. Segundo os autores, as discrepâncias entre as velocidades obtidas em tal trabalho e as fornecidas pelo modelo geofísico NNR-NUVEL 1A se devem ao fato de que o modelo NNR-NUVEL 1A não modela deformações em zonas de bordas de placas. Portanto, no presente trabalho, tal argumento justifica as discrepâncias observadas para as estações SANT e PIN1, que estão localizadas em zonas de grandes deformações.

Vale lembrar que as discrepâncias nestas duas estações, ora observadas com relação aos modelos geofísicos, não se verificam com relação às soluções fornecidas pelos ITRF 97 e ITRF 2000.

Analogamente ao caso das velocidades no sistema cartesiano, são agora apresentadas as discrepâncias em termos das componentes (N , E , u). A Tabela 5.9 mostra as discrepâncias entre a solução final e as realizações ITRF 97 e ITRF 2000 (transformada para ITRF 97). Os valores das velocidades fornecidas pelas realizações ITRF 97 e ITRF 2000 originais (à época 1997,0), em termos das componentes do sistema geodésico local, podem ser consultados no Apêndice E1, e as discrepâncias entre as mesmas, no Apêndice E2.

TABELA 5.9 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as fornecidas pelas soluções ITRF 97 e ITRF 2000/97, em termos das componentes do sistema local

Estação	$(V_N, V_E, V_u)_{\text{solução final}} - (V_N, V_E, V_u)_{\text{ITRF 97}}$			$(V_N, V_E, V_u)_{\text{solução final}} - (V_N, V_E, V_u)_{\text{ITRF 2000/97}}$		
	ΔV_N (m/a)	ΔV_E (m/a)	ΔV_u (m/a)	ΔV_N (m)	ΔV_E (m)	ΔV_u (m)
BOMJ				-0,0080	0,0021	0,0116
BRAZ	-0,0069	0,0022	0,0113	-0,0104	0,0003	-0,0003
CRAT						
CUIB				-0,0059	0,0020	0,0052
FORT	-0,0031	-0,0047	-0,0021	-0,0039	-0,0046	-0,0019
IMPZ				-0,0100	-0,0019	0,0298
MANA				0,0026	0,0010	0,0196
PARA				-0,0039	0,0000	0,0030
POAL						
RECF						
SALV						
UEPP				-0,0048	0,0025	0,0063
VICO				-0,0036	0,0025	0,0094
ASC1	0,0023	-0,0036	0,0128	-0,0007	-0,0024	0,0067
EISL	-0,0079	0,0081	-0,0059	-0,0087	0,0091	-0,0036
FAIR	-0,0063	0,0015	-0,0094	-0,0068	0,0014	-0,0091
GOLD	-0,0077	-0,0073	0,0002	-0,0078	-0,0070	0,0007
LPGS	0,0016	0,0050	0,0182	-0,0007	0,0029	0,0125
PINI	0,0059	0,0028	-0,0101			
SANT	-0,0014	0,0064	0,0121	-0,0034	0,0053	0,0137
SUTH	0,0061	0,0093	-0,0033	-0,0001	0,0051	-0,0047
Erro Médio	-0,0017	0,0020	0,0024	-0,0048	0,0011	0,0062
Desvio Padrão	0,0055	0,0056	0,0103	0,0038	0,0039	0,0099
EMQ	0,0057	0,0059	0,0105	0,0060	0,0040	0,0116

Analisando o EMQ das discrepâncias entre velocidades, em termos das componentes do sistema geodésico local, nota-se que a componente u (up) é a que fornece os piores resultados, atingindo valores de aproximadamente 1 cm/ano, em relação ao ITRF 97 e ao ITRF 2000. As componentes horizontais, por sua vez, apresentam melhor acurácia, atingindo o valor máximo de 6 mm/ano.

Novamente, considerando as estações que se fazem presentes em pelo menos dois tipos de solução, as Figuras 5.13 e 5.14 ilustram as discrepâncias entre as velocidades das soluções apresentadas na Tabela 5.9, em termos das componentes (N , E , u).

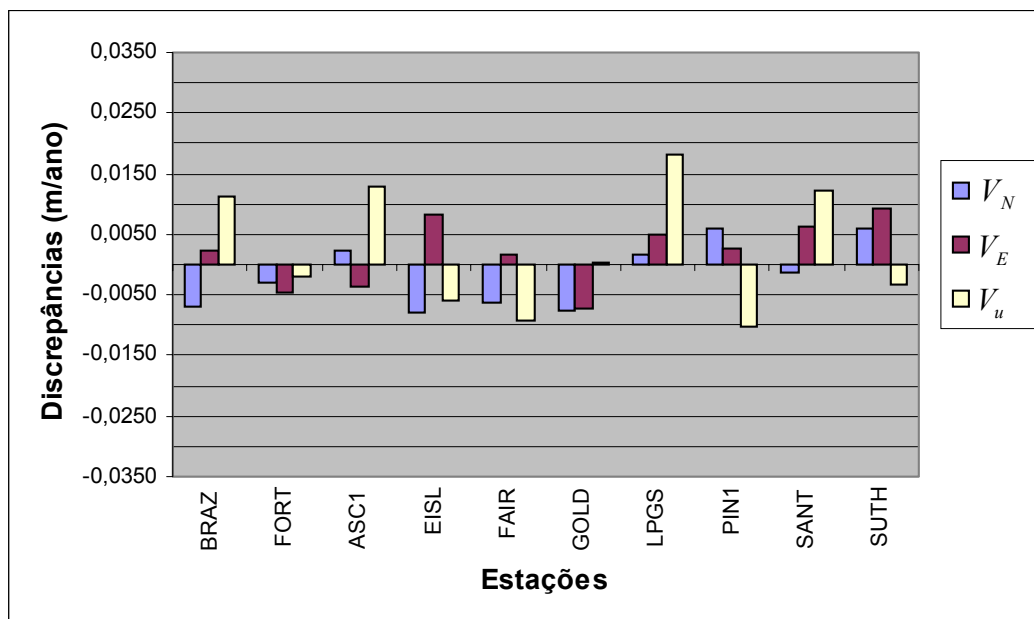


FIGURA 5.13 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as do ITRF 97, em termos das componentes do sistema local

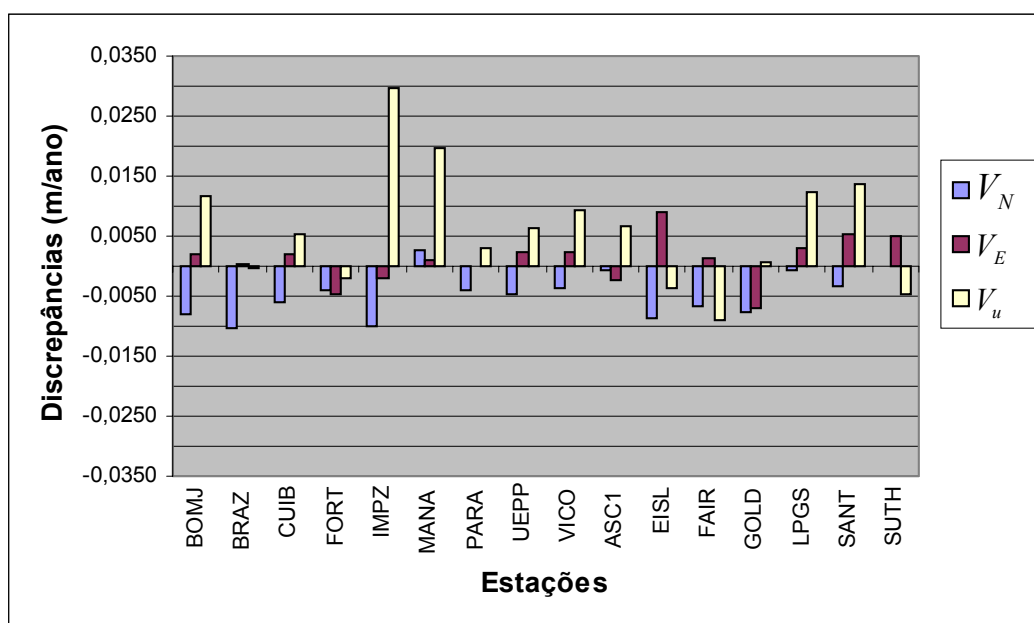


FIGURA 5.14 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as transformadas do ITRF 2000 para o ITRF 97, em termos das componentes do sistema local

Como se pode notar, a componente u das velocidades no sistema geodésico local é a que apresenta as maiores discrepâncias. Com relação

ao ITRF 2000, as maiores discrepâncias se fazem presentes novamente nas estações IMPZ e MANA, fato que pode ser considerado normal, levando-se em conta a precisão das velocidades de tais estações no ITRF 2000 (consultar <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/solutions.html> (acessado em 2 de outubro de 2002)). Além disso, como estas duas estações já haviam apresentado maiores discrepâncias em termos das componentes cartesianas (Figura 5.10), é natural que tais discrepâncias sejam propagadas para as componentes no sistema local, quando da transformação de um sistema para o outro.

Comparando a solução final do trabalho com as dos modelos geofísicos, elaborou-se a Tabela 5.10, que apresenta as discrepâncias entre tais soluções, em termos das componentes do sistema geodésico local. Os valores das velocidades fornecidas por estes modelos podem ser consultados no Apêndice F1.

TABELA 5.10 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as fornecidas pelos modelos geofísicos, em termos das componentes do sistema local

Estação	$(V_N, V_E, V_u)_{\text{solução final}} - (V_N, V_E, V_u)_{\text{NNR NUVEL 1A}}$			$(V_N, V_E, V_u)_{\text{solução final}} - (V_N, V_E, V_u)_{\text{APKIM 2000}}$		
	ΔV_N (m/a)	ΔV_E (m/a)	ΔV_u (m/a)	ΔV_N (m/a)	ΔV_E (m/a)	ΔV_u (m/a)
BOMJ	-0,0068	0,0003	0,0113	-0,0043	-0,0011	0,0113
BRAZ	-0,0106	0,0012	0,0024	-0,0082	-0,0001	0,0024
CRAT						
CUIB	-0,0056	0,0035	0,0091	-0,0033	0,0023	0,0090
FORT	-0,0049	-0,0032	-0,0003	-0,0022	-0,0049	-0,0003
IMPZ	-0,0065	-0,0028	-0,0012	-0,0040	-0,0045	-0,0012
MANA	-0,0070	0,0059	0,0137	-0,0049	0,0043	0,0137
PARA	-0,0041	0,0020	0,0091	-0,0016	0,0010	0,0091
POAL	-0,0043	0,0028	0,0106	-0,0020	0,0020	0,0106
RECF	-0,0001	0,0018	-0,0022	0,0026	0,0003	-0,0022
SALV	-0,0012	0,0040	-0,0039	0,0017	0,0032	-0,0048
UEPP	-0,0038	0,0025	0,0098	-0,0014	0,0014	0,0098
VICO	-0,0033	0,0010	0,0104	-0,0007	-0,0001	0,0105
ASC1	-0,0027	-0,0034	0,0045	-0,0003	-0,0034	0,0048
EISL	-0,0083	-0,0032	-0,0020	-0,0066	0,0088	-0,0020
FAIR	-0,0099	0,0036	-0,0094	-0,0099	0,0012	-0,0094
GOLD	-0,0027	-0,0111	-0,0006	-0,0014	-0,0126	-0,0005
LPGS	-0,0010	0,0033	0,0151	0,0012	0,0029	0,0151
PINI	-0,0133	0,0147	-0,0080	-0,0120	0,0175	-0,0080
SANT	0,0026	0,0252	0,0200	0,0043	0,0250	0,0200
SUTH	-0,0030	0,0012	-0,0013	0,0001	0,0040	-0,0012
Erro Médio	-0,0048	0,0025	0,0044	-0,0026	0,0024	0,0043
Desvio Padrão	0,0038	0,0073	0,0081	0,0041	0,0079	0,0081
EMQ	0,0061	0,0077	0,0092	0,0049	0,0082	0,0092

As discrepâncias apresentadas na Tabela 5.10 são ilustradas pelas Figuras 5.15 e 5.16, em termos das componentes (N , E , u) do sistema geodésico local.

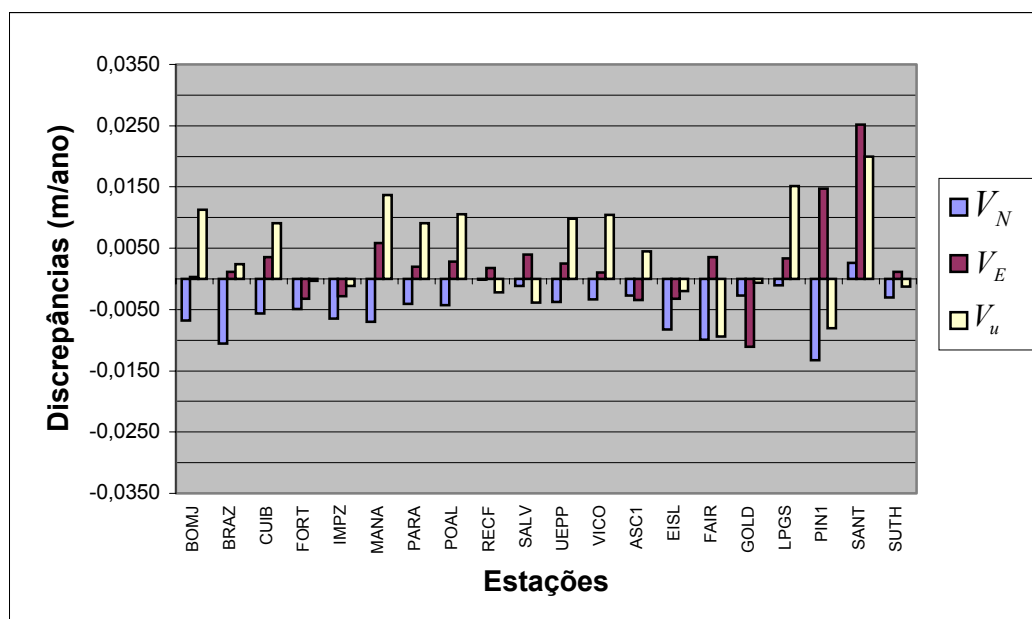


FIGURA 5.15 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as do modelo NNR-NUVEL 1A, em termos das componentes do sistema local

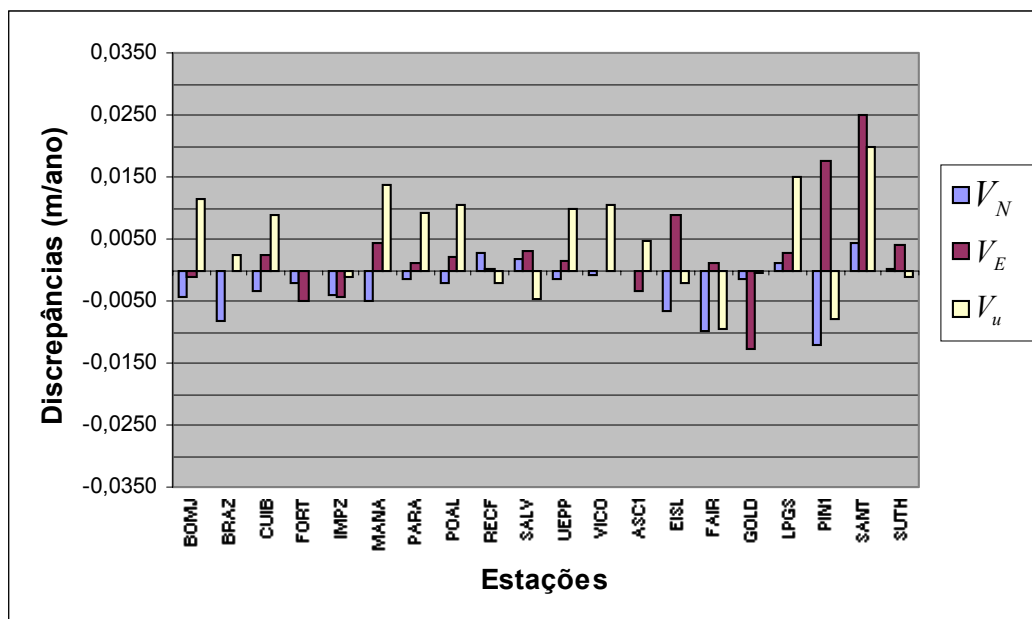


FIGURA 5.16 – Discrepâncias entre as velocidades da solução final e as do modelo APKIM 2000, em termos das componentes do sistema local

Como já esperado, as discrepâncias com relação aos modelos geofísicos, em termos das componentes do sistema local (Figuras 5.15 e 5.16), apresentam-se de forma semelhante àsquelas observadas em termos das componentes cartesianas (Figuras 5.11 e 5.12). Em ambos os casos, as maiores discrepâncias ocorrem para as estações Pinyon Flats (PIN1) e Santiago (SANT). Novamente, tais discrepâncias são justificadas pelo fato de os modelos geofísicos não modelarem deformações em zonas de bordas de placas.

De forma geral, foi possível notar que as maiores discrepâncias nas velocidades das estações PIN1 e SANT não comparecem com relação ao ITRF97 e o ITRF 2000, mas sim com relação aos modelos geofísicos. Isto leva a crer que o fato de se utilizarem técnicas mais sofisticadas que as dos modelos geofísicos na criação dos ITRF 97 e ITRF 2000, para monitorar o movimento de placas, faça com que a estimativa das velocidades seja realizada com maior qualidade e eficácia. Desta forma, a comparação entre resultados obtidos por meio de técnicas geodésicas semelhantes (em termos de precisão), como é o caso da solução final e aquelas fornecidas pelos ITRF 97 e ITRF 2000, realmente deveria apresentar discrepâncias menores que as observadas com relação aos modelos geofísicos.

No que diz respeito à comparação com os modelos geofísicos, os resultados (Figuras 5.15 e 5.16) levam a crer que, em geral, a estimativa de velocidades para estações localizadas próximas a bordas de placas é mais complexa que para estações situadas em regiões de baixa atividade tectônica. Nas regiões de bordas de placas, os movimentos são muito mais intensos e complexos, podendo envolver colisões, afastamentos, cisalhamentos e outros tipos de interações entre placas vizinhas. Considerando então que, nessas regiões, o verdadeiro movimento das placas pode ser diferente daquele preconizado pelos modelos geofísicos, parece natural esperar discrepâncias mais elevadas para estações localizadas nessas regiões.

Entretanto, um outro cuidado muito importante que deve ser tomado, durante o processamento dos dados, diz respeito aos parâmetros da antena da estação, que devem ser corretamente considerados. Um caso específico

em que houve troca de antena, durante o período considerado para o processamento realizado no presente trabalho, foi o da estação PIN1. Dessa forma, para o período vigente de cada antena da estação considerada, o processamento devia ser efetuado considerando os parâmetros vigentes da antena que estava instalada na referente ocasião (época).

De forma mais abrangente, considerando agora todas as estações envolvidas, procurou-se identificar os possíveis motivos pelos quais as discrepâncias em coordenadas e velocidades de determinadas componentes de algumas estações são, de forma geral, mais elevadas. Para tanto, uma alternativa foi a de tentar obter uma solução de coordenadas do tipo *bias_fix*, ou seja, uma solução obtida fixando-se as ambigüidades. Nessa tentativa, foram processadas, conjuntamente, duas estações cuja linha de base pode ser considerada relativamente curta, realizando-se duplas-diferenças de ambigüidades. As estações consideradas foram UEPP e PARA. Contudo, verificou-se que a maioria das ambigüidades não foi fixada, optando-se por abandonar tal procedimento para as outras estações. De qualquer forma, outros argumentos devem ser levados em conta, como, por exemplo: a quantidade de dados processados, que poderia ser maior; o espaçamento entre os conjuntos de dados do período considerado, que poderia ser reduzido com o aumento da quantidade de dados; a utilização de órbitas não-fiduciais no processamento, em vez de órbitas fiduciais; entre outros.

As Figuras 5.17 a 5.20 ilustram, graficamente, o campo horizontal de velocidades obtido para a solução final deste trabalho, em termos das componentes do sistema geodésico local. Conjuntamente, ilustra-se o campo fornecido por cada um dos quatro modelos considerados, em comparação com os vetores da solução final. Tais resultados foram gerados com o *software* científico *GNUPLOT*, de domínio público, e útil para representação gráfica de diversas funções em ciências exatas.

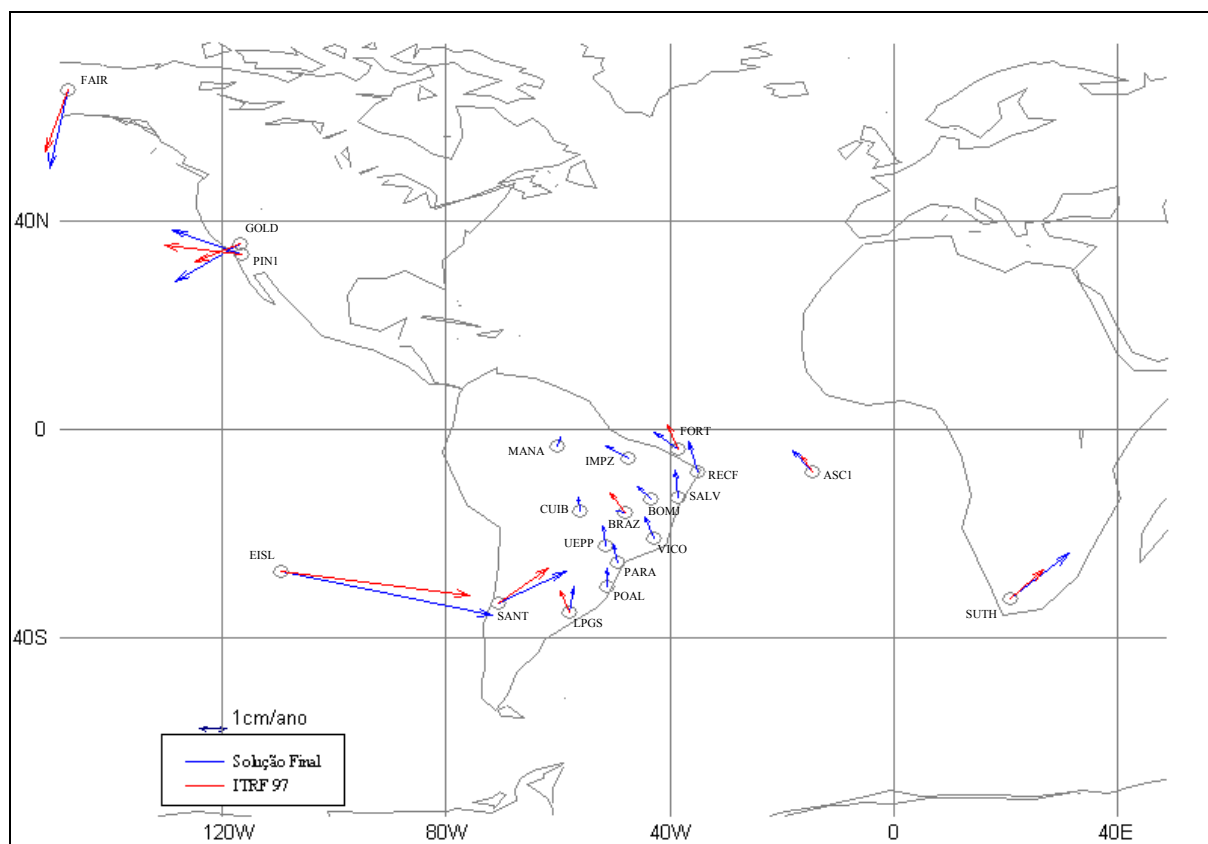


FIGURA 5.17 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pela solução ITRF 97

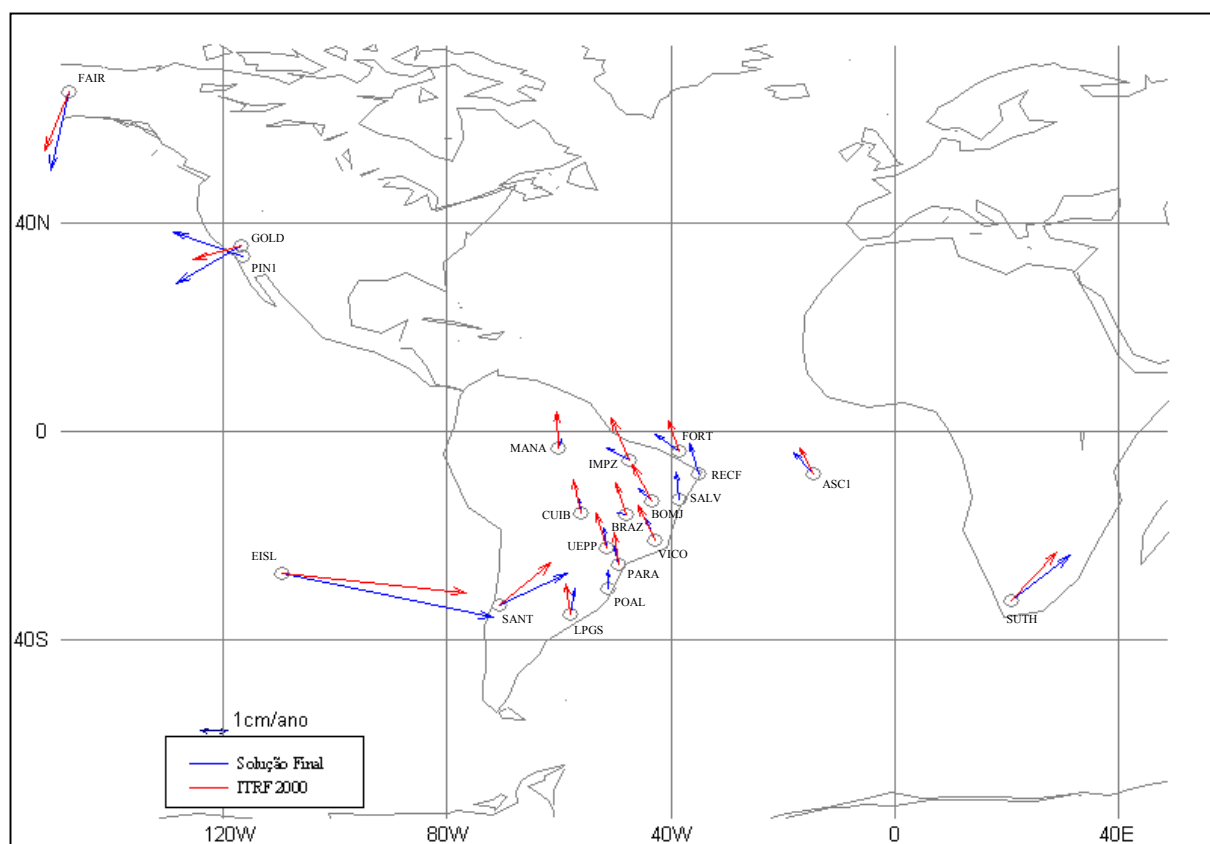


FIGURA 5.18 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pela solução ITRF 2000

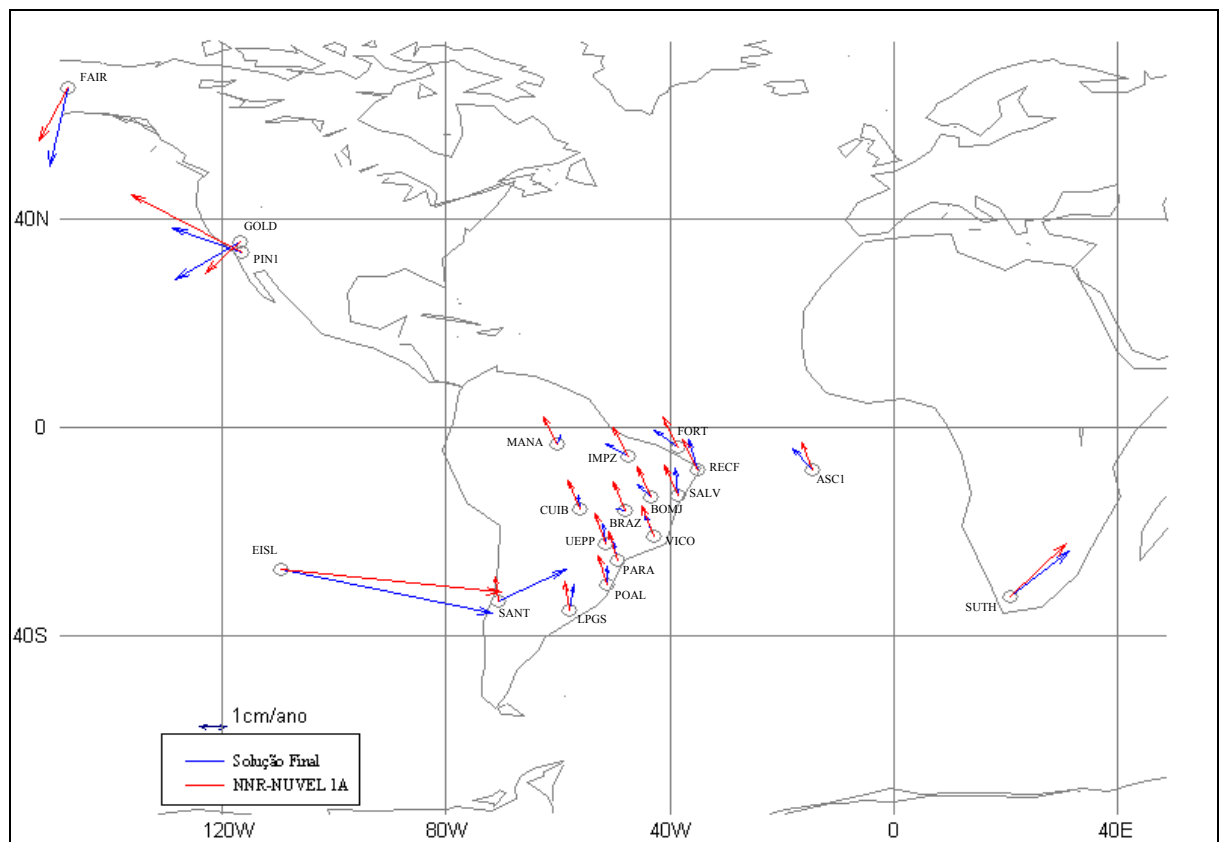


FIGURA 5.19 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pelo modelo geofísico NNR-NUVEL 1A

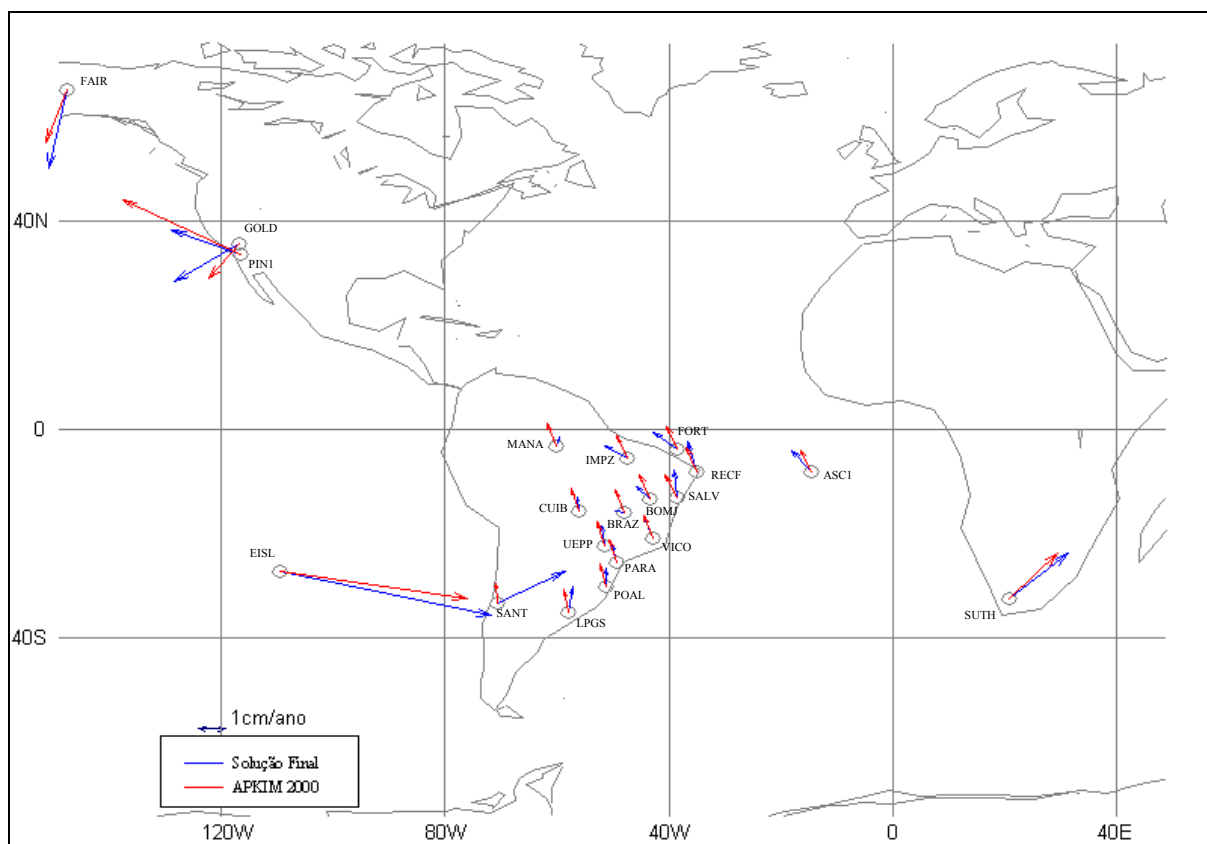
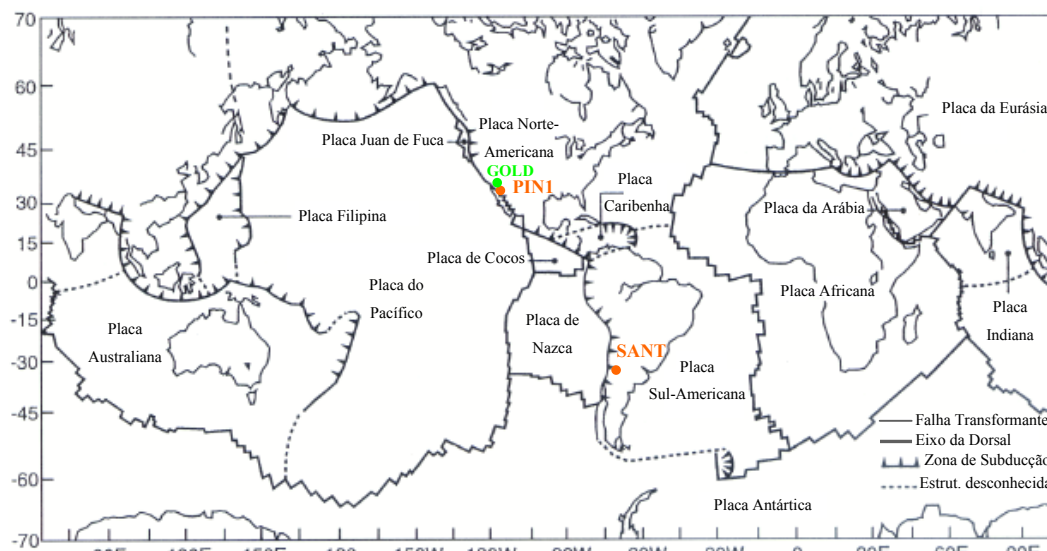


FIGURA 5.20 – Campo de velocidades da solução final comparado com o campo fornecido pelo modelo geofísico APKIM 2000

A Figura 5.21 ilustra a localização das estações que apresentaram velocidades mais discrepantes com relação aos modelos geofísicos.



FONTE: Adaptada de Turcotte & Schubert (2001, p. 2)

FIGURA 5.21 – Localização das estações que apresentaram discrepâncias mais elevadas com relação aos modelos geofísicos

Pode-se perceber que as duas estações em destaque (PIN1 e SANT) localizam-se nas proximidades de bordas de placas. Parece intuitivo imaginar que o movimento de estações localizadas em bordas de placas que se afastam é menos brusco que aquele relacionado a bordas que se chocam frontalmente.

Particularmente, a estação PIN1 situa-se em regiões de hotspots, que são áreas anômalas de superfície vulcânica (TURCOTTE & SCHUBERT, 2001, p. 14). Assim como a estação PIN1, a estação GOLD também apresenta uma discrepância significativa na componente horizontal E das velocidades (Figuras 5.15 e 5.16). Embora o mapa da Figura 5.21 não apresente maiores detalhes, estas duas estações localizam-se em lados opostos da famosa Falha de *San Andreas*, na Califórnia, justificando a possível causa de estações tão próximas uma da outra estarem se movimentando em direções bastante distintas (ver Figuras 5.17 a 5.20).

Por sua vez, a estação SANT localiza-se próxima a zonas de subducção²⁸, geralmente caracterizadas por movimentos muito complicados e deformações relativamente grandes.

De forma geral, os vetores de velocidade ilustrados nas Figuras 5.17 a 5.20 apresentam discrepâncias com tendência levemente mais freqüente em termos da direção do movimento do que da intensidade do mesmo. Quanto a esta segunda variável, as intensidades das velocidades de duas soluções diferentes se mostraram menos divergentes para estações localizadas em regiões afastadas das bordas de placas.

Independentemente da solução considerada, as estações da RBMC apresentaram velocidades com intensidades bastante parecidas, haja vista estarem localizadas numa região de baixa atividade tectônica da Placa Sul-Americana. Em termos da direção do movimento, nestes casos, uma solução diverge um pouco da outra; entretanto, para cada solução individual, a direção do movimento é praticamente a mesma para todas as estações.

Vale observar o alto valor para a velocidade da estação EISL, localizada sobre a Placa de Nazca. Particularmente, uma feição geológica de dimensões gigantescas (principalmente na direção vertical), como é o caso da Cadeia Andina, pode servir como base científica para justificar velocidades mais elevadas para estações com longitudes próximas à da estação EISL. Em Costa (1999), pode-se obter resultados semelhantes, principalmente com relação à estação Galápagos (GALA), que apresenta velocidades com intensidades semelhantes, segundo os modelos NNR-NUVEL 1 A, APKIM 8.8, ITRF 96 e IGS RNAAC²⁹ SIRGAS.

Com base na equação (5.11) e, valendo-se das velocidades cartesianas obtidas na solução final deste trabalho, foram calculadas as componentes do Vetor de Euler, segundo os eixos X, Y e Z, para a Placa Sul-Americana (SOAM). Convém mencionar que as componentes obtidas para o Vetor de Euler, com esse método, são absolutas e, portanto, foram descontadas

²⁸ Neste caso, a Placa de Nazca mergulha sob a Placa Sul-Americana, em direção ao manto.

²⁹ RNAAC: *Regional Network Associate Analysis Centers*.

das respectivas componentes do Vetor de Euler para a Placa do Pacífico (PCFC), obtidas em McCarthy (1996). Deve-se lembrar que, neste trabalho, a placa PCFC foi considerada como referencial para o movimento das demais placas litosféricas. A Tabela 5.11 apresenta os valores das componentes do Vetor de Euler ($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$) para a Placa SOAM, já descontados das componentes da Placa PCFC, segundo as velocidades das estações LPGA (La Plata), FORT (Fortaleza) e ASC1 (Ascension). Em comparação, são apresentados também os valores obtidos por Altamimi (2002), segundo o ITRF 2000, utilizando as mesmas estações (mais a estação Kourou).

TABELA 5.11 – Vetores de Euler para a Placa SOAM

Solução	Ω_x (rad/Ma)	Ω_y (rad/Ma)	Ω_z (rad/Ma)
SOLUÇÃO FINAL	-0,00041	0,00670	-0,00912
ITRF 2000	-0,00046	0,00606	-0,00975

Pode-se observar, de acordo com a Tabela 5.11, que os valores fornecidos pelas duas soluções apresentam boa concordância, comprovando, em princípio, a eficácia da solução obtida neste trabalho. Assim sendo, os parâmetros de rotação determinados podem ser utilizados para predizer ou recuperar o vetor velocidade de qualquer estação localizada em território nacional.

5.3 Análise da Influência da Escolha da Época de Referência

No intuito de analisar a possível influência que a escolha da época de referência pode exercer sobre a precisão das coordenadas das estações, foram tomados como base cálculos experimentais com a inversa da matriz N (equação 4.19), calculada no ajustamento. Essa matriz³⁰ pode ser escrita como:

³⁰ Neste caso, a matriz N^{-1} está sendo representada de forma simplificada, como se a quantidade de parâmetros a serem determinados fosse igual à da equação 4.6, para facilitar a análise. Na realidade, sabe-se que $X_t = (x, y, z)$ e $V_t = (v_x, v_y, v_z)$.

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n (t - t_n)^2}{n[\sum_{i=1}^n (t - t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t - t_n)]^2} & - \frac{\sum_{i=1}^n (t - t_n)}{n[\sum_{i=1}^n (t - t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t - t_n)]^2} \\ - \frac{\sum_{i=1}^n (t - t_n)}{n[\sum_{i=1}^n (t - t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t - t_n)]^2} & \frac{n}{n[\sum_{i=1}^n (t - t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t - t_n)]^2} \end{bmatrix}, (5.13)$$

onde n é o número de épocas.

A ordem desta matriz, como se pode observar, é 2x2, de forma que sua diagonal principal é formada pelos termos que, teoricamente, fornecem a precisão dos parâmetros X_t e V_t , respectivamente, nas posições 1x1 e 2x2 da matriz.

Considerando que o período de dados adotado para o processamento é de 3 anos (ver Tabelas 4.2 a 4.7), analisou-se a matriz N^{-1} para diferentes épocas de referência, algumas contidas no intervalo de processamento, outras não. A Tabela 5.12 apresenta as precisões dos parâmetros para cada época de referência considerada.

Vale notar que o intervalo de tempo considerado para o processamento dos dados deste trabalho é igual ao intervalo em destaque na Tabela 5.12, mas ambos não são contemporâneos. Utilizou-se tal procedimento apenas para facilitar os cálculos com a equação (5.13), haja vista que os resultados seriam os mesmos, pois o intervalo de tempo continua sendo de 3 anos.

TABELA 5.12 – Precisão dos parâmetros para diferentes épocas t de referência

	Época de Referência	Parâmetros	Precisão
	1995,0	X _t V _t	4,3 0,2
	1996,0	X _t V _t	2,7 0,2
	1997,0	X _t V _t	1,5 0,2
Intervalo considerado no processamento	1998,0	X _t V _t	0,7 0,2
	1999,0	X _t V _t	0,3 0,2
	1999,5 (época média)	X _t V _t	0,25 0,2
	2000,0	X _t V _t	0,3 0,2
	2001,0	X _t V _t	0,7 0,2
	2002,0	X _t V _t	1,5 0,2

Pode-se perceber a variação da precisão das coordenadas para diferentes épocas de referência. Por sua vez, a precisão das velocidades não se altera, confirmando a adoção de um modelo no qual supõe-se que a velocidade das placas seja uniforme. A Figura 5.22 ilustra graficamente tal comportamento. Convém notar que, tanto na Tabela 5.12 quanto na Figura 5.22, a unidade da precisão dos parâmetros não precisa ser mencionada, haja vista que o objetivo da análise é apenas demonstrar o comportamento qualitativo da variação observada, e não quantitativo. Dessa forma, uma análise complementar mais generalizada da equação 5.13 pode ser verificada no Apêndice A.

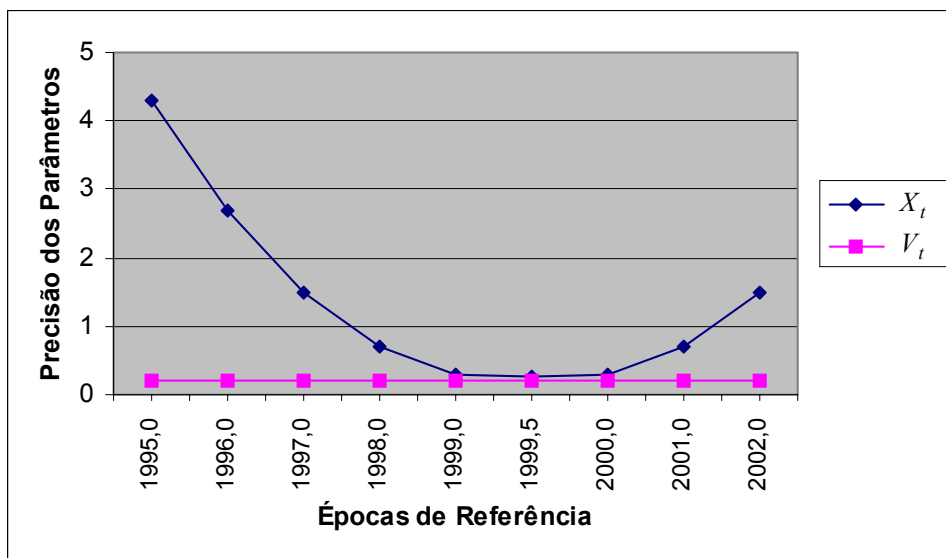


FIGURA 5.22 – Influência da escolha da época de referência na precisão dos parâmetros

A Figura 5.22 mostra que a precisão das coordenadas se deteriora conforme a época de referência escolhida se afasta da época média do intervalo de dados utilizado no processamento. Portanto, a adoção da época média como referência (no gráfico, como exemplo, $t=1999,5$) é a decisão mais adequada. No entanto, vale lembrar que a época média adotada como referência neste trabalho é $t=2000,2$, que é uma média aritmética aproximada das épocas utilizadas neste trabalho.

6 COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora este trabalho tenha sofrido algumas modificações com respeito à quantidade de estações processadas, foi possível se ter uma idéia do comportamento das coordenadas das estações localizadas em território nacional, bem como da influência causada pelas placas vizinhas sobre a Placa Sul-Americana. Vale lembrar que, durante a realização do projeto, ocorreram diversos problemas no que diz respeito à obtenção das órbitas e dados a serem utilizados no processamento.

Em primeira instância, o objetivo principal desta pesquisa foi atingido, tendo sido estimado o campo de velocidades para as estações consideradas. Complementarmente, os resultados das comparações com outras fontes (soluções ITRFyy e modelos geofísicos) foram obtidos e, apesar de se observar discrepâncias um pouco elevadas, tais resultados parecem estar coerentes, principalmente para as estações localizadas em regiões de baixa atividade tectônica. De forma geral, a velocidade e direção com que as estações processadas se movimentam parecem ser características das regiões em que tais estações se localizam, demonstrando a eficácia do posicionamento por GPS.

A proposta de desenvolvimento de uma metodologia para o processamento contínuo de estações GPS foi, de certa forma, executada com sucesso. A criação do arquivo em lote **semiaut** (seção 4.3) facilitou enormemente o processamento das estações, caracterizando uma economia significativa do tempo gasto com relação ao processamento individual de cada estação. Entretanto, a rotina **semiaut** ainda pode ser bastante melhorada, de modo a transformá-la em um programa que automatize totalmente o processamento.

No que concerne à utilização do Posicionamento por Ponto Preciso com GPS, verificou-se o bom desempenho do método, em virtude da ótima precisão obtida para as grandezas estimadas no ajustamento.

A escolha de uma época média de referência durante o processo de ajustamento é, em geral, o procedimento mais utilizado atualmente por autores de trabalhos semelhantes a este. De qualquer forma, experimentos numéricos (seção 5.3) e algébricos (Apêndice A) com a inversa da matriz N do ajustamento

realizado neste trabalho, demonstraram que a escolha de épocas de referência cada vez mais próximas da época média do intervalo escolhido fornece melhor precisão para as coordenadas. Trata-se de época de variância mínima.

Em princípio, a quantidade de épocas determinada para o processamento, bem como o espaçamento entre os períodos escolhidos, parecem influenciar nos valores obtidos para as incógnitas e suas respectivas precisões. Um bom exemplo foi o da estação Crato, que apresentou resultados bastante discrepantes com relação aos das demais estações. O DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*), com base em soluções numéricas e metodologias do APKIM, tem buscado desestimular soluções que utilizam períodos de dados inferiores a 5 anos. Entretanto, como autores de alguns trabalhos já obtiveram resultados coerentes com períodos mais curtos de dados, optou-se por utilizar um período de 3 anos.

Desta forma, entre as contribuições fornecidas por este trabalho, pode-se citar:

- determinação do campo de velocidades para as estações da RBMC e de algumas do IGS localizadas na Placa Sul-Americana e vizinhas, utilizando o Posicionamento por Ponto Preciso com GPS, caracterizado por ser um método altamente preciso na aplicação em estudos de Geodinâmica;
- utilização de um sistema de referência apropriado, caso particular do ITRS (realização ITRF 97), contribuindo para a adoção de um sistema de referência geocêntrico pelo Brasil, fato que se torna cada vez mais iminente com o projeto SIRGAS;
- estabelecimento de uma metodologia semi-automática para processamento contínuo de estações GPS com o *software* GOA II.

Entre as recomendações que podem ser feitas e cuidados que devem ser tomados para utilização em futuras pesquisas, estão:

- escolha de períodos maiores de dados para a estimativa de coordenadas e velocidades de estações geodésicas;
- determinação cuidadosa dos parâmetros corretos da antena de cada estação cujos dados venham a ser processados, verificando se houve deslocamento ou troca da antena em diferentes épocas;
- análise mais rigorosa sobre a influência que a escolha da época de referência exerce sobre a precisão dos parâmetros estimados;
- processamento de dados de estações localizadas tanto em regiões de baixa quanto de alta atividade tectônica, no intuito de estimar as velocidades características das regiões geomorfologicamente diferentes do planeta e, conseqüentemente, compreender o comportamento dinâmico existente em cada região;
- sempre comparar os resultados obtidos com outras fontes conhecidas e novas que possam surgir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNEW, D. C. **NLOADF: A Program for Computing Ocean-Tide Loading**. Disponível em: [<http://www.agu.org/pubs/abs/jb/96JB03458/96JB03458.html>]. Acessado em: 14 de dezembro de 2001. 1996.

ALTAMIMI, Z. **ITRF Solutions**. Disponível em: [<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/solutions.html>]. Acessado em 28 de maio de 2002. 1997.

ALTAMIMI, Z. **Classification of the Coordinates for ITRF 94**. Disponível em: [<ftp://lareg.ensg.ign.fr/pub/itrf/itrf94/ITRF94CLA>]. Acessado em 28 de maio de 2002. 1997.

ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P.; BOUCHER, C. **ITRF 2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications**. Institut Géographique National, Paris, France. 2002. (A ser publicado).

BOCK, Y. Reference System. In: KLEUSBERG, A.; TEUNISSEN, P. J. G. **GPS for Geodesy**. 2nd edition. Berlin: Editora Verlag, 1998. p. 1-42.

BOUCHER, C.; ALTAMIMI, Z. **The Initial IERS Terrestrial Reference Frame. IERS Technical Note 1**, Observatoire de Paris, 1989.

BOUCHER, C.; ALTAMIMI, Z.; FEISSEL, M.; SILLARD, P. **Results and Analysis of the ITRF 94. IERS Technical Note 20**, Observatoire de Paris, 1996.

BOUCHER, C.; ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P. **Results and Analysis of the ITRF 96. IERS Technical Note 24**, Observatoire de Paris, 1998. 166 p.

BOUCHER, C.; ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P. **The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF 97). IERS Technical Note 27**, Observatoire de Paris, 1999. 191 p.

BOUCHER, C. **ITRF 2000 Workshop Recommendations**. Disponível em: [<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF2000/ITRF2000.RECOM>]. Acessado em 29 de maio de 2002. 2001.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência**. Curitiba, 1999. 191 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

CHAVES, J. C., *Uso da Tecnologia GPS na Monitoração de Deformação: Sistemas, Etapas e Experimentos*. São Carlos, 2001, 155 p., Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

CONDIE, K. C. *Plate Tectonics & Crustal Evolution*, Third Edition, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico, 1989, 476 p.

COSTA, S. M. A. *Integração da Rede Geodésica Brasileira aos Sistemas de Referência Terrestres*, Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba, 1999, 156 p.

De JONGE, P. *A Processing Strategy for the Application of the GPS in Networks*. Delft, 1998. 225 p. PhD Thesis – Technical University of Delft.

De METS, C.; GORDON, R. G.; ARGUS, D. F.; STEIN, S. *Current Plate Motions*. In: *Geophysical Journal International* (1990), v. 101, 425-478.

De METS, C.; GORDON, R. G.; VOGT, P. *Location of the Africa-Australia-India Triple Junction and Motion between the Australian and Indian Plates: Results from an Aeromagnetic Investigation of the Central Indian and Carlsberg Ridges*. In: *Geophysical Journal International* (1994), v. 119, 893-930.

DREWES, H. *A Geodetic Approach for the Recovery of Global Kinematic Plate Parameters*. *Bulletin Géodésique*, n. 56, pp. 70-79, 1982.

DREWES, H. *Global and Regional Deformation Models of the Earth's Surface*. In: M. J. SEVILLA; H. HENNEBERG; R. VIEIRA (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Cartography and Geodesy*, Maracaibo (Venezuela), 1992, Instituto de Astronomía y Geodesia, Madrid, 288-298, 1993.

DREWES, H. *Plate Kinematic Models*. Disponível em: [<http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/geodis/GDYN/platamodels.html>]. Acessado em: 15 de maio de 2002. 1998.

DU, Z.; FOULGER, G. R. *Variation in the Crustal Structure across Central Iceland*. *Geophysical Journal International* (2001), 145, 246-264.

FANG, M. & HAGER, B. H. *Vertical Deformation and Absolute Gravity*. In: *Geophysical Journal International* (2001), 146, 539-548.

FORTES, L. P. S. *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*. Dissertação de Mestrado, IME, 1997, 152 p.

GE, L. et al. ***The Integration of Collocated GPS, VLBI and SLR Results.*** University of New South Wales, Australia. 10 p. 2000.

GEMAEL, C. *O Programa de Marés Terrestres da UFPR: Sua Importância Geodésica.* ***Revista Brasileira de Geofísica***, 1986, v. 4, 85-89.

GEMAEL, C. ***Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas.*** Editora UFPR, Curitiba, 1994, 319 p.

GEORGIADOU, Y. *Ionospheric Delay Modelling For GPS Relative Positioning.* In: ***International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System.*** Ottawa, Canada. Proceedings..., Sep 3-7, p. 403-10, 1990.

GREGORIUS, T. ***GIPSY-OASIS II: How it works.*** Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne, 1996, 152 p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. ***GPS Theory and Practice.*** Wien: Springer-Verlag, 4 ed., 1997. 389 p.

IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). ***SIRGAS – Relatório Final.*** IAG97, Rio de Janeiro. 1997.

IERS, C. B. ***Coordinates of the Mean Rotation Axis, Since 1962 (EOP (IERS) 97 C 01).*** Disponível em: [http://www.iers.org/iers/publications/bulletins/bull_a/]. Acessado em: 23 de maio de 2002. 2001.

KLOBUCHAR, J. A. *Design and Characteristics of the GPS Ionospheric Time Delay Algorithm for Single Frequency Users.* In: ***PLANS-86 Conference.*** Las Vegas. Proceedings..., p. 280-6, 1986.

LANGLEY, R. B. *Propagation of the GPS Signals.* In: KLEUSBERG, A.; TEUNISSEN, P. J. G. ***GPS for Geodesy.*** 2nd edition. Berlin. Editora Verlag, 1998. 650 p.

LEICK, A. ***GPS Satellite Surveying.*** New York: John Wiley & Sons, 1995. 560 p.

McCARTHY, D. D. *IERS Conventions (1996).* ***IERS Technical Note 21.*** Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris, 1996. 95 p.

MONICO, J. F. G. ***High Precision Intercontinental GPS Network.*** Nottingham, 1995, 205 p. *PhD Thesis* - University of Nottingham.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento por Ponto de Alta Precisão: Uma Ferramenta para a Geodinâmica. Revista Brasileira de Geofísica*. Rio de Janeiro, RJ, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2000a.

MONICO, J. F. G. ***Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações***. Editora UNESP, São Paulo, 2000, 287 p.

NEWBY, S. P.; LANGLEY, R. B. *Ionospheric Modelling For Single Frequency Users Of The Global Positioning System: A Status Report*. In: ***International Symposium on Precise Positioning With The Global Positioning System***, (2). Ottawa, Canada. Proceedings..., p. 429-43, 1990.

NEWBY, S. P.; LANGLEY, R. B. *Three Alternative Empirical Ionospheric Models – Are They Better Than The GPS Broadcast Model?* In: ***International Geodetic Symposium on Satellite Positioning***, (6). Proceedings..., v.1, p. 240-4, 17 to 20 March 1992.

ODISHAW, H. ***Research in Geophysics: Solid Earth and Interface Phenomena***. The M.I.T Press, v.2, ed. 2, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts. 1964. 595 p.

OLIVEIRA, L. C. ***Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro Associadas ao SAD69: Uma Proposta Metodológica de Transformação***. São Paulo, 1998. 197 p. Tese de Doutorado – Departamento de Transportes – EPUSP.

PRESS, F.; SIEVER, R. ***Earth***. Fourth Edition, W. H. Freeman and Company, New York, 1986, 656 p.

SÁ, N. C. ***GPS: Fundamentos e Aplicações***. Departamento de Geofísica, IAG-USP, 1999, 87 p.

SAASTAMOINEN, J. *Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction. Bulletin Géodésique*, n. 107, March 1973, 13-34.

SAPUCCI, L. F. ***Estimativa do Vapor d'Água Atmosférico e a Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico Utilizando GPS***. Presidente Prudente, 2001, 165 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Cartografia – FCT/UNESP.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. ***Investigando a Compatibilidade entre as Realizações do ITRS. Geodésia on line (Revista da Comissão Brasileira de Geodésia)***, FCT-UNESP, Campus de Presidente Prudente, 2001.

SCIGN (Southern California Integrated GPS Network). **Status and Plans**. Disponível em: [http://www.scign.org/docs/SCIGN_2002-report_FINAL.pdf]. Acessado em: 16 de outubro de 2002. 2001.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Walter de Gruyter, N. York, 1993, 531 p.

SEEMÜLLER, W.; KANIUTH, K.; DREWES, H. *Horizontal and Vertical Movements of the IGS Regional Reference Network for South America*. **IAG 2001 Scientific Assembly**, Budapest, 2.-8.9.2001.

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

SOLER, T. *A Compendium of Transformation Formulas Useful in GPS Work*. **Journal of Geodesy**, 72 (7/8): 484-490, 1998.

SPIPKER JR, J. J.; PARKINSON, B. W. *GPS Operation and Design*. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER JR, J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996a. v.1, 793 p.

SPIPKER JR, J. J. *GPS Tropospheric Effects on GPS*. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER JR, J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996b. v.1, 793 p.

STIEGLITZ, T. C.; DICKMAN, S. R. *Refined Correlations Between Atmospheric and Rapid Polar Motion Excitations*. In: **Geophysical Journal International** (1999), v. 139, 115-122.

TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. *GPS Observation Equations and Positioning Concepts*. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2nd edition. Berlin. Editora Verlag, 1998. 650 p.

TORGE, W. **Geodesy**. Second Edition, Walter de Gruyter, New York, 1991, 264 p.

TORGE, W. **Geodesy**. Third Edition, Walter de Gruyter, New York, 2001, 416 p.

TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT, G. **Geodynamics**, Second Edition. Cambridge University Press, United Kingdom, 2001. 456 p.

VAN DAM, T. M.; WAHR, J. M. *Displacements of the Earth's Surface Due to Atmospheric Loading: Effects on Gravity and Baseline Measurements. **Journal of Geophysical Research***, v. 92, n. B2, p. 1281-6, 1987.

VITI, M.; ALBARELLO, D.; MANTOVANI, E. *Classification of Seismic Strain Estimates in the Mediterranean Region from a 'Bootstrap' Approach. In: **Geophysical Journal International** (2001), 146, 399-415.*

VUOLO, J. H. *Introdução à Teoria de Erros*. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 93 p. São Paulo, 1992.

WAHR, J. M. *The Forced Nutations of an Elliptical, Rotating, Elastic, and Oceanless Earth. **Geophys. J. Roy. Astron. Soc.***, 64, 1981, pp. 705-727.

WEILL, L. R. *Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle. **GPS World***, p. 59-66, Apr. 1997

WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P., TRANQUILLA, J. M., VANICEK, P. ***Guide to GPS Positioning***. Canadian GPS Associates, December 1986 (First printing), New Brunswick, Canada.

WÜNSCH, J.; THOMAS, M.; GRUBER, Th. *Simulation of Oceanic Bottom Pressure for Gravity Space Missions. **Geophysical Journal International***, 2001, 147, 428-434.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. *Precise Point Positioning for The Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. **Journal of Geophysical Research***, v. 102, n. B3, p. 5005-17, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ANÁLISE LITERAL DA EQUAÇÃO 5.13 PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCOLHA DA ÉPOCA DE REFERÊNCIA

Observando a equação 5.13, pode-se notar que a expressão contida no denominador é igual para todos os termos que compõem a matriz. Tomando-se então qualquer um dos termos da matriz, é possível desenvolver e simplificar seu denominador. Reescrevendo a equação original, tem-se:

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2}{n[\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t-t_n)]^2} & -\frac{\sum_{i=1}^n (t-t_n)}{n[\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t-t_n)]^2} \\ -\frac{\sum_{i=1}^n (t-t_n)}{n[\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t-t_n)]^2} & \frac{n}{n[\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t-t_n)]^2} \end{bmatrix}. \quad (A1)$$

Assim, considere o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} n[\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2] &= n[(t-t_1)^2 + (t-t_2)^2 + \dots + (t-t_n)^2] = \\ &= n[t^2 - 2tt_1 + t_1^2 + t^2 - 2tt_2 + t_2^2 + \dots + t^2 - 2tt_n + t_n^2] = . \quad (A2) \\ &= n[nt^2 - (2t \sum_{i=1}^n t_i) + \sum_{i=1}^n t_i^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\sum_{i=1}^n (t-t_n)]^2 &= [(t-t_1) + (t-t_2) + \dots + (t-t_n)]^2 = \\ &= [t-t_1 + t-t_2 + \dots + t-t_n]^2 = [nt - \sum_{i=1}^n t_i]^2 = . \quad (A3) \\ &= [n^2 t^2 - 2nt \sum_{i=1}^n t_i + (\sum_{i=1}^n t_i)^2] \end{aligned}$$

Subtraindo então (A3) de (A2), chega-se à seguinte expressão para o denominador:

$$n[\sum_{i=1}^n (t-t_n)^2] - [\sum_{i=1}^n (t-t_n)]^2 = (n \sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2. \quad (A4)$$

Portanto, conclui-se que o denominador dos termos da matriz em (A1) não depende da época de referência (t).

Sabendo-se então que a expressão para o denominador é constante, cujo valor é conhecido a partir do momento em que se estabelecem quais e quantas épocas serão consideradas no processamento, a análise da precisão das coordenadas se resume a uma análise do numerador do termo de posição 1x1 da matriz em (A1). Desenvolvendo o numerador, tem-se:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (t-t_n)^2 &= (t-t_1)^2 + (t-t_2)^2 + \dots + (t-t_n)^2 = \\ &= t^2 - 2t t_1 + t_1^2 + t^2 - 2t t_2 + t_2^2 + \dots + t^2 - 2t t_n + t_n^2 = . \\ &= n t^2 - (2t \sum_{i=1}^n t_i) + \sum_{i=1}^n t_i^2 = \text{mínimo} \end{aligned} \quad (A5)$$

Derivando em relação a t e igualando a zero, vem:

$$\begin{aligned} 2nt - 2\sum_{i=1}^n t_i &= 0 \\ t &= \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \Rightarrow \text{época média é o mínimo} \end{aligned} \quad (A6)$$

Portanto, conclui-se que a época média do intervalo de dados é a época de variância mínima. Tal análise, por sua vez, confirma a conclusão previamente obtida na seção (5.3), ou seja: a precisão das coordenadas se deteriora conforme a época de referência escolhida se afasta da época média do intervalo de dados utilizado no processamento. A precisão das velocidades permanece inalterada, uma vez que o numerador do termo de posição 2x2 depende apenas do número de épocas (n) considerado, que é constante.

A.1 Atualização de Coordenadas (análise complementar)

Quando se deseja prever as coordenadas de uma determinada estação numa época futura, num mesmo referencial, logo se pensa na atualização das coordenadas de tal estação, previamente determinadas numa época de referência t qualquer.

Supondo então que as coordenadas tenham sido previamente determinadas para uma época média de referência t e, sabendo que a precisão destas fica deteriorada caso elas sejam determinadas para uma época $t+i$ (para uma época no extremo do intervalo de dados, por exemplo), é interessante verificar o comportamento da precisão das coordenadas ao atualizá-las para uma época posterior (fora do intervalo de dados) a “ t ” e a “ $t+i$ ”.

Pergunta-se: qual será a precisão das coordenadas atualizadas, considerando-se cada um dos dois casos (“ t ” e “ $t+i$ ”) como época de referência? Para solucionar esta questão, escolheu-se uma das estações consideradas no trabalho e, para essa, recalcularam-se suas coordenadas para uma outra época de referência, haja vista que, para a época média $t = 2000,2$, estas já haviam sido calculadas. A escolhida foi a estação UEPP e a época de referência adotada foi $t = 2001,2$ (no extremo do intervalo de dados).

Assim, tem-se um conjunto de coordenadas, velocidades e respectivos desvios-padrão para a estação UEPP, calculado para cada época de referência:

- Época de referência $t = 2000,2$:
 - $X = (3687624,3185 \pm 0,0004) \text{ m};$
 - $Y = (-4620818,5947 \pm 0,0004) \text{ m};$
 - $Z = (-2386880,3705 \pm 0,0002) \text{ m};$
 - $V_x = (0,0064 \pm 0,0004) \text{ m/ano};$
 - $V_y = (-0,0101 \pm 0,0004) \text{ m/ano};$
 - $V_z = (0,0031 \pm 0,0002) \text{ m/ano}.$

- Época de referência $t = 2001,2$:
 - $X = (3687624,3251 \pm 0,0007) \text{ m}$;
 - $Y = (-4620818,6051 \pm 0,0007) \text{ m}$;
 - $Z = (-2386880,3672 \pm 0,0004) \text{ m}$;
 - $V_x = (0,0064 \pm 0,0004) \text{ m/ano}$;
 - $V_y = (-0,0101 \pm 0,0004) \text{ m/ano}$;
 - $V_z = (0,0031 \pm 0,0002) \text{ m/ano}$.

Suponha então que se queira atualizar as coordenadas para uma época futura, por exemplo, $t_{atualiz} = 2005,0$. Considerando $X = (X,Y,Z)$, a expressão que permite a atualização das coordenadas de uma época “ t ” (ou “ $t+i$ ”) para uma época $t_{atualiz}$ é dada por:

$$X_{atualiz} = X_t + V_t (t_{atualiz} - t), \quad (A7)$$

onde $X_{atualiz}$ representa as coordenadas atualizadas, X_t as coordenadas à época t , e V_t a velocidade à época t .

O desvio-padrão das coordenadas atualizadas é obtido por propagação de erros, sendo expresso como:

$$\sigma_{X_{atualiz}} = \sqrt{\sigma_{X_t}^2 + \sigma_{V_t}^2 (t_{atualiz} - t)^2}, \quad (A8)$$

cujos termos são denominados de forma análoga aos da equação (A7).

As coordenadas atualizadas são as seguintes:

- De $t = 2000,2$ para $t_{atualiz} = 2005,0$:
 - $X_{atualiz} = (3687624,3490 \pm 0,0020) \text{ m}$;
 - $Y_{atualiz} = (-4620818,6420 \pm 0,0020) \text{ m}$;
 - $Z_{atualiz} = (-2386880,3850 \pm 0,0010) \text{ m}$;

- De $t = 2001,2$ para $t_{atualiz} = 2005,0$:
 - $X_{atualiz} = (3687624,3560 \pm 0,0020) \text{ m};$
 - $Y_{atualiz} = (-4620818,6070 \pm 0,0020) \text{ m};$
 - $Z_{atualiz} = (-2386880,3520 \pm 0,0010) \text{ m}.$

Finalmente, observando as precisões das coordenadas atualizadas, verificou-se que são iguais para ambos os casos. Em princípio, a questão crucial era descobrir qual dos dois casos apresentaria maior degradação da precisão, quando se fizesse a atualização. No primeiro caso, a precisão das coordenadas à época $t = 2000,2$ é melhor que para a época $t = 2001,2$, mas o afastamento temporal com relação à época $t_{atualiz} = 2005,0$ é maior. Já para o segundo caso, o afastamento temporal é menor, porém a precisão das coordenadas é pior.

Mas ainda existe uma outra pergunta a ser feita: qual será a precisão das coordenadas atualizadas, considerando-se como referência uma época “ $t - i$ ” anterior à época média?

Para solucionar este outro caso, adotou-se como referência a época $t = 1999,2$. Logo, um terceiro conjunto de coordenadas e velocidades (e respectivos desvios-padrão) para a estação UEPP é:

- Época de referência $t = 1999,2$:
 - $X = (3687624,3123 \pm 0,0004) \text{ m};$
 - $Y = (-4620818,5849 \pm 0,0004) \text{ m};$
 - $Z = (-2386880,3735 \pm 0,0002) \text{ m};$
 - $V_x = (0,0064 \pm 0,0004) \text{ m/ano};$
 - $V_y = (-0,0101 \pm 0,0004) \text{ m/ano};$
 - $V_z = (0,0031 \pm 0,0002) \text{ m/ano}.$

Atualizando as coordenadas para a época $t_{\text{atualiz}} = 2005,0$, vem:

- $X_{\text{atualiz}} = (3687624,3490 \pm 0,0023) \text{ m};$
- $Y_{\text{atualiz}} = (-4620818,6440 \pm 0,0023) \text{ m};$
- $Z_{\text{atualiz}} = (-2386880,3550 \pm 0,0012) \text{ m}.$

Nota-se, neste caso, que a precisão das coordenadas atualizadas é diferente (e pior) da precisão obtida nos dois casos anteriores.

Por fim, após verificar os três casos em questão ($t-i$, t e $t+i$), pode-se concluir que a precisão das coordenadas atualizadas para uma época futura:

- independe da escolha da época de referência, se a mesma for escolhida no intervalo entre a época média (de variância mínima) e a época para a qual as coordenadas são atualizadas;
- se degrada cada vez mais, ao se escolher épocas de referência anteriores e cada vez mais afastadas da época de variância mínima (época média).

APÊNDICE B1 - COORDENADAS CARTESIANAS DA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO E DO ITRF 97

Estação	Solução Final do Trabalho			ITRF 97 (época 2000,2)		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
BOMJ	4510195,8486	-4268322,3202	-1453035,3294			
BRAZ	4115014,0910	-4550641,5360	-1741444,0439	4115014,073	-4550641,529	-1741444,052
CRAT	4888826,1064	-4017957,5945	-798309,0139			
CUIB	3430711,4108	-5099641,5585	-1699432,9581			
FORT	4985386,6108	-3954998,5958	-428426,4614	4985386,638	-3954998,599	-428426,4706
IMPZ	4289656,4515	-4680884,9404	-606347,3575			
MANA	3179009,3804	-5518662,1225	-344401,8474			
PARA	3763751,6518	-4365113,7912	-2724404,7189			
POAL	3467519,4088	-4300378,5244	-3177517,7566			
RECF	5176588,6542	-3618162,1479	-887363,9495			
SALV	4863495,7319	-3870312,3403	-1426347,8446			
UEPP	3687624,3185	-4620818,5947	-2386880,3705			
VICO	4373283,3193	-4059639,0388	-2246959,7560			
ASC1	6118526,0696	-1572344,7066	-876451,1552	6118526,070	-1572344,702	-876451,1659
EISL	-1884951,5483	-5357595,9298	-2892890,5463	-1884951,550	-5357595,946	-2892890,558
FAIR	-2281621,4930	-1453595,8016	5756961,8559	-2281621,501	-1453595,804	5756961,869
GOLD	-2353614,2277	-4641385,3640	3676976,4181	-2353614,226	-4641385,376	3676976,423
LPGS	2780102,9859	-4437418,8819	-3629404,5810	2780102,974	-4437418,874	-3629404,581
PINI	-2369510,5351	-4761207,0865	3511396,1948			
SANT	1769693,4141	-5044574,1539	-3468321,0320	1769693,415	-5044574,169	-3468321,049
SUTH	5041274,8193	1916054,0624	-3397076,0454	5041274,824	1916054,049	-3397076,060

APÊNDICE B2 - COORDENADAS CARTESIANAS DA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO E DO ITRF 2000

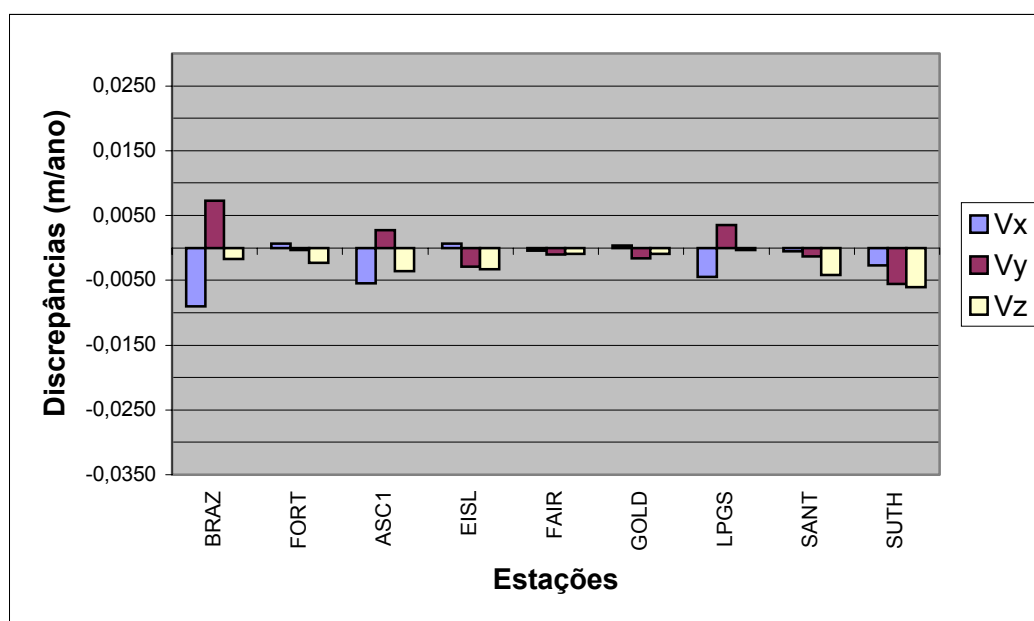
Estação	Solução Final do Trabalho			ITRF 2000 (época 2000,2)		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
BOMJ	4510195,8486	-4268322,3202	-1453035,3294	4510195,843	-4268322,327	-1453035,307
BRAZ	4115014,0910	-4550641,5360	-1741444,0439	4115014,089	-4550641,552	-1741444,024
CRAT	4888826,1064	-4017957,5945	-798309,0139			
CUIB	3430711,4108	-5099641,5585	-1699432,9581	3430711,411	-5099641,569	-1699432,941
FORT	4985386,6108	-3954998,5958	-428426,4614	4985386,623	-3954998,601	-428426,4433
IMPZ	4289656,4515	-4680884,9404	-606347,3575	4289656,454	-4680884,942	-606347,3399
MANA	3179009,3804	-5518662,1225	-344401,8474	3179009,371	-5518662,119	-344401,8222
PARA	3763751,6518	-4365113,7912	-2724404,7189	3763751,653	-4365113,801	-2724404,703
POAL	3467519,4088	-4300378,5244	-3177517,7566			
RECF	5176588,6542	-3618162,1479	-887363,9495			
SALV	4863495,7319	-3870312,3403	-1426347,8446			
UEPP	3687624,3185	-4620818,5947	-2386880,3705	3687624,315	-4620818,606	-2386880,351
VICO	4373283,3193	-4059639,0388	-2246959,7560	4373283,313	-4059639,045	-2246959,736
ASC1	6118526,0696	-1572344,7066	-876451,1552	6118526,069	-1572344,713	-876451,1334
EISL	-1884951,5483	-5357595,9298	-2892890,5463	-1884951,556	-5357595,938	-2892890,526
FAIR	-2281621,4930	-1453595,8016	5756961,8559	-2281621,502	-1453595,805	5756961,880
GOLD	-2353614,2277	-4641385,3640	3676976,4181	-2353614,232	-4641385,369	3676976,438
LPGS	2780102,9859	-4437418,8819	-3629404,5810	2780102,977	-4437418,886	-3629404,555
PINI	-2369510,5351	-4761207,0865	3511396,1948			
SANT	1769693,4141	-5044574,1539	-3468321,0320	1769693,408	-5044574,167	-3468321,012
SUTH	5041274,8193	1916054,0624	-3397076,0454	5041274,826	1916054,055	-3397076,027

APÊNDICE C1 - VELOCIDADES CARTESIANAS DA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO E DAS SOLUÇÕES ITRF 97 E ITRF 2000

Estação	Solução Final do Trabalho			ITRF 97 (época 1997,0)			ITRF 2000 (época 1997,0)		
	Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)	Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)	Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)
BOMJ	0,0056	-0,0117	0,0020				-0,0033	-0,0063	0,0140
BRAZ	0,0004	-0,0055	0,0062	-0,0085	0,0010	0,0098	0,0005	-0,0063	0,0115
CRAT	-0,0567	0,1479	-0,0178						
CUIB	0,0050	-0,0087	0,0027				0,0009	-0,0066	0,0113
FORT	-0,0053	-0,0070	0,0068	-0,0006	-0,0047	0,0098	-0,0013	-0,0044	0,0121
IMPZ	-0,0065	-0,0049	0,0050				-0,0252	0,0180	0,0194
MANA	0,0075	-0,0117	0,0028				-0,0039	0,0055	0,0143
PARA	0,0061	-0,0097	0,0025				0,0049	-0,0085	0,0090
POAL	0,0076	-0,0100	0,0006						
RECF	-0,0026	-0,0027	0,0119						
SALV	-0,0019	-0,0001	0,0112						
UEPP	0,0064	-0,0101	0,0032				0,0014	-0,0080	0,0116
VICO	0,0069	-0,0112	0,0040				-0,0009	-0,0075	0,0123
ASC1	0,0038	-0,0088	0,0071	-0,0080	-0,0021	0,0066	-0,0025	-0,0048	0,0102
EISL	0,0750	-0,0161	-0,0144	0,0645	-0,0219	-0,0101	0,0638	-0,0190	-0,0068
FAIR	-0,0232	-0,0068	-0,0212	-0,0226	-0,0046	-0,0101	-0,0222	-0,0036	-0,0092
GOLD	-0,0243	0,0034	-0,0121	-0,0157	0,0043	-0,0060	-0,0161	0,0059	-0,0051
LPGS	0,0107	-0,0144	-0,0007	-0,0020	-0,0037	0,0084	0,0025	-0,0072	0,0087
PIN1	-0,0175	0,0218	0,0031	-0,0253	0,0125	0,0038			
SANT	0,0308	-0,0139	-0,0009	0,0216	-0,0072	0,0069	0,0221	-0,0059	0,0111
SUTH	$\approx_0$	0,0229	0,0154	0,0030	0,0141	0,0085	0,0057	0,0197	0,0146

APÊNDICE C2 – DISCREPÂNCIAS ENTRE AS VELOCIDADES FORNECIDAS PELAS SOLUÇÕES ITRF 97 E ITRF 2000

Estação	$(V_x, V_y, V_z)_{ITRF\ 97} - (V_x, V_y, V_z)_{ITRF\ 2000}$		
	ΔV_x (m/a)	ΔV_y (m/a)	ΔV_z (m/a)
BOMJ			
BRAZ	-0,0090	0,0073	-0,0017
CRAT			
CUIB			
FORT	0,0007	-0,0003	-0,0023
IMPZ			
MANA			
PARA			
POAL			
RECF			
SALV			
UEPP			
VICO			
ASC1	-0,0055	0,0027	-0,0036
EISL	0,0007	-0,0029	-0,0033
FAIR	-0,0004	-0,0010	-0,0009
GOLD	0,0004	-0,0016	-0,0009
LPGS	-0,0045	0,0035	-0,0003
SANT	-0,0005	-0,0013	-0,0042
SUTH	-0,0027	-0,0056	-0,0061
Erro Médio	-0,0023	0,0001	-0,0026
Desvio Padrão	0,0034	0,0038	0,0019
EMQ	0,0041	0,0038	0,0032



APÊNDICE D1 - VELOCIDADES CARTESIANAS DA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO E DOS MODELOS GEOFÍSICOS

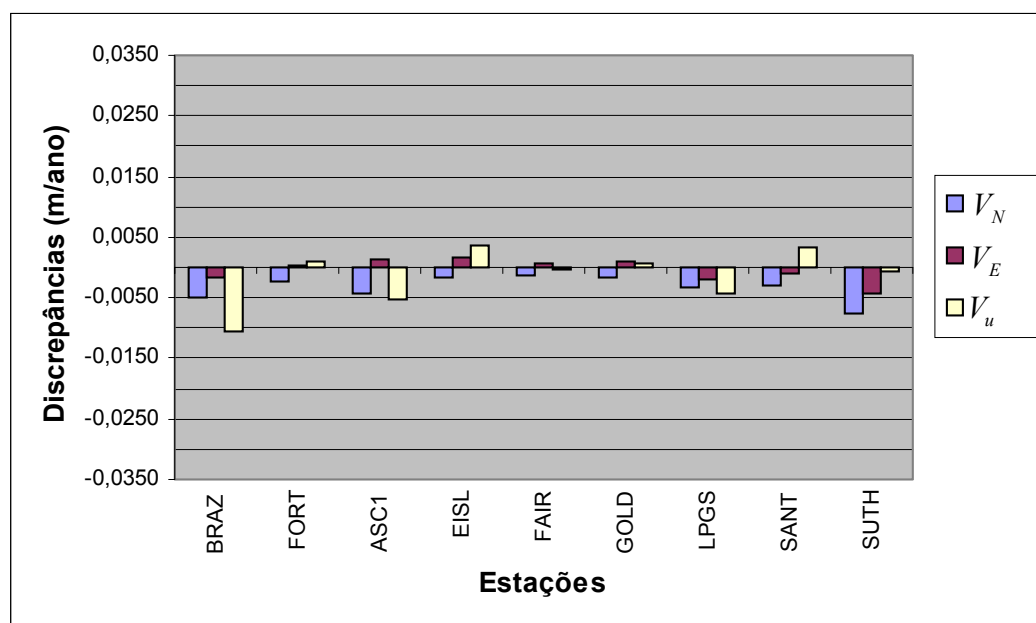
Estação	Solução Final do Trabalho			NNR-NUVEL 1A			APKIM 2000		
	Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)	Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)	Vx(m/a)	Vy(m/a)	Vz(m/a)
BOMJ	0,0056	-0,0117	0,0020	-0,0015	-0,0054	0,0112	-0,0009	-0,0040	0,0088
BRAZ	0,0004	-0,0055	0,0062	-0,0013	-0,0054	0,0109	-0,0008	-0,0040	0,0086
CRAT	-0,0567	0,1479	-0,0178	-0,0023	-0,0051	0,0116	-0,0015	-0,0036	0,0090
CUIB	0,0050	-0,0087	0,0027	-0,0019	-0,0047	0,0105	-0,0012	-0,0036	0,0083
FORT	-0,0053	-0,0070	0,0068	-0,0028	-0,0048	0,0117	-0,0019	-0,0034	0,0090
IMPZ	-0,0065	-0,0049	0,0050	-0,0032	-0,0044	0,0114	-0,0021	-0,0031	0,0089
MANA	0,0075	-0,0117	0,0028	-0,0043	-0,0031	0,0105	-0,0029	-0,0022	0,0084
PARA	0,0061	-0,0097	0,0025	0,0003	-0,0061	0,0102	0,0004	-0,0047	0,0080
POAL	0,0076	-0,0100	0,0006	0,0010	-0,0063	0,0097	0,0009	-0,0049	0,0077
RECF	-0,0026	-0,0027	0,0119	-0,0018	-0,0054	0,0116	-0,0012	-0,0039	0,0089
SALV	-0,0019	-0,0001	0,0112	-0,0012	-0,0057	0,0114	-0,0019	-0,0042	0,0088
UEPP	0,0064	-0,0101	0,0032	-0,0004	-0,0057	0,0104	-0,0001	-0,0043	0,0082
VICO	0,0069	-0,0112	0,0040	-0,0001	-0,0061	0,0108	-0,0001	-0,0046	0,0084
ASC1	0,0038	-0,0088	0,0071	≈0	-0,0044	0,0105	≈0	-0,0044	0,0081
EISL	0,0750	-0,0161	-0,0144	0,0763	-0,0225	-0,0079	0,0652	-0,0178	-0,0095
FAIR	-0,0232	-0,0068	-0,0212	-0,0210	-0,0011	-0,0086	-0,0197	-0,0032	-0,0086
GOLD	-0,0243	0,0034	-0,0121	-0,0139	-0,0006	-0,0096	-0,0129	-0,0019	-0,0108
LPGS	0,0107	-0,0144	-0,0007	0,0016	-0,0062	0,0088	0,0013	-0,0049	0,0070
PIN1	-0,0175	0,0218	0,0031	-0,0304	0,0289	0,0186	-0,0333	0,0295	0,0175
SANT	0,0308	-0,0139	-0,0009	0,0009	-0,0051	0,0079	0,0008	-0,0042	0,0065
SUTH	≈0	0,0229	0,0154	0,0030	0,0180	0,0173	0,0024	0,0196	0,0147

**APÊNDICE E1 - VELOCIDADES DA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO
E DAS SOLUÇÕES ITRFyy, EM TERMOS DAS
COMPONENTES DO SISTEMA LOCAL**

Estação	Solução Final do Trabalho			ITRF 97 (época 1997,0)			ITRF 2000 (época 1997,0)		
	V _N (m/a)	V _E (m/a)	V _u (m/a)	V _N (m/a)	V _E (m/a)	V _u (m/a)	V _N (m/a)	V _E (m/a)	V _u (m/a)
BOMJ	0,0047	-0,0046	0,0113				0,0140	-0,0068	-0,0013
BRAZ	0,0007	-0,0034	0,0024	0,0076	-0,0056	-0,0089	0,0124	-0,0038	0,0016
CRAT	-0,0350	0,0782	-0,134						
CUIB	0,0053	-0,0007	0,0090				0,0125	-0,0029	0,0027
FORT	0,0068	-0,0087	-0,0003	0,0099	-0,0040	0,0018	0,0122	-0,0042	0,0009
IMPZ	0,0049	-0,0081	-0,0012				0,0164	-0,0064	-0,0320
MANA	0,0035	0,0007	0,0137				0,0139	-0,0006	-0,0075
PARA	0,0072	-0,0017	0,0091				0,0122	-0,0018	0,0048
POAL	0,0068	-0,0004	0,0106						
RECF	0,0116	-0,0036	-0,0022						
SALV	0,0105	-0,0012	-0,0039						
UEPP	0,0074	-0,0013	0,0098				0,0134	-0,0039	0,0022
VICO	0,0082	-0,0035	0,0104				0,0131	-0,0061	-0,0002
ASC1	0,0078	-0,0076	0,0048	0,0055	-0,0040	-0,0080	0,0099	-0,0052	-0,0026
EISL	-0,0172	0,0762	-0,0020	-0,0093	0,0681	0,0039	-0,0075	0,0665	0,0002
FAIR	-0,0301	-0,0067	-0,0094	-0,0238	-0,0082	≈0	-0,0226	-0,0089	0,0004
GOLD	-0,0145	-0,0232	-0,0006	-0,0068	-0,0159	-0,0008	-0,0053	-0,0170	-0,0013
LPGS	0,0097	0,0014	0,0151	0,0081	-0,0036	-0,0031	0,0114	-0,0017	0,0011
PIN1	0,0090	-0,0254	-0,0080	0,0031	-0,0282	0,0021			
SANT	0,0120	0,0244	0,0200	0,0134	0,0180	0,0079	0,0163	0,0189	0,0047
SUTH	0,0174	0,0214	-0,0013	0,0113	0,0121	0,0020	0,0189	0,0164	0,0026

APÊNDICE E2 - DISCREPÂNCIAS ENTRE AS VELOCIDADES FORNECIDAS PELAS SOLUÇÕES ITRF 97 E ITRF 2000, EM TERMOS DAS COMPONENTES DO SISTEMA LOCAL

Estação	$(V_N, V_E, V_u)_{ITRF\ 97} - (V_N, V_E, V_u)_{ITRF\ 2000}$		
	ΔV_N (m/a)	ΔV_E (m/a)	ΔV_u (m/a)
BOMJ			
BRAZ	-0,0048	-0,0018	-0,0105
CRAT			
CUIB			
FORT	-0,0023	0,0002	0,0009
IMPZ			
MANA			
PARA			
POAL			
RECF			
SALV			
UEPP			
VICO			
ASC1	-0,0044	0,0012	-0,0054
EISL	-0,0018	0,0016	0,0037
FAIR	-0,0012	0,0007	-0,0004
GOLD	-0,0015	0,0011	0,0005
LPGS	-0,0033	-0,0019	-0,0042
SANT	-0,0029	-0,0009	0,0032
SUTH	-0,0076	-0,0043	-0,0006
Erro Médio	-0,0019	-0,0003	-0,0008
Desvio Padrão	0,0025	0,0019	0,0046
EMQ	0,0031	0,0019	0,0046



OBS: Pode-se verificar que as resultantes das velocidades são iguais àquelas observadas no Apêndice C2.

**APÊNDICE F1 - VELOCIDADES DA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO
E DOS MODELOS GEOFÍSICOS, EM TERMOS DAS
COMPONENTES DO SISTEMA LOCAL**

Estação	Solução Final do Trabalho			NNR-NUVEL 1A			APKIM 2000		
	V _N (m/a)	V _E (m/a)	V _u (m/a)	V _N (m/a)	V _E (m/a)	V _u (m/a)	V _N (m/a)	V _E (m/a)	V _u (m/a)
BOMJ	0,0047	-0,0046	0,0113	0,0115	-0,0049	≈0	0,0090	-0,0035	≈0
BRAZ	0,0007	-0,0034	0,0024	0,0113	-0,0046	≈0	0,0089	-0,0033	≈0
CRAT	-0,0350	0,0782	-0,134	0,0117	-0,0054	≈0	0,0090	-0,0037	≈0
CUIB	0,0053	-0,0007	0,0090	0,0109	-0,0042	-0,0001	0,0086	-0,0030	≈0
FORT	0,0068	-0,0087	-0,0003	0,0117	-0,0055	≈0	0,0090	-0,0038	≈0
IMPZ	0,0049	-0,0081	-0,0012	0,0114	-0,0053	≈0	0,0089	-0,0036	≈0
MANA	0,0035	0,0007	0,0137	0,0105	-0,0052	≈0	0,0084	-0,0036	≈0
PARA	0,0072	-0,0017	0,0091	0,0113	-0,0037	≈0	0,0088	-0,0027	≈0
POAL	0,0068	-0,0004	0,0106	0,0111	-0,0032	≈0	0,0088	-0,0024	≈0
RECF	0,0116	-0,0036	-0,0022	0,0117	-0,0054	≈0	0,0090	-0,0039	≈0
SALV	0,0105	-0,0012	-0,0039	0,0117	-0,0052	≈0	0,0088	-0,0044	0,0009
UEPP	0,0074	-0,0013	0,0098	0,0112	-0,0038	≈0	0,0088	-0,0027	≈0
VICO	0,0082	-0,0035	0,0104	0,0115	-0,0045	≈0	0,0089	-0,0034	-0,0001
ASC1	0,0078	-0,0076	0,0048	0,0105	-0,0042	0,0003	0,0081	-0,0042	≈0
EISL	-0,0172	0,0762	-0,0020	-0,0089	0,0794	≈0	-0,0106	0,0674	≈0
FAIR	-0,0301	-0,0067	-0,0094	-0,0202	-0,0103	≈0	-0,0202	-0,0079	≈0
GOLD	-0,0145	-0,0232	-0,0006	-0,0118	-0,0121	≈0	-0,0131	-0,0106	-0,0001
LPGS	0,0097	0,0014	0,0151	0,0107	-0,0019	≈0	0,0085	-0,0015	≈0
PIN1	0,0090	-0,0254	-0,0080	0,0223	-0,0401	≈0	0,0210	-0,0429	≈0
SANT	0,0120	0,0244	0,0200	0,0094	-0,0008	≈0	0,0077	-0,0006	≈0
SUTH	0,0174	0,0214	-0,0013	0,0204	0,0202	≈0	0,0173	0,0174	-0,0001