

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

PAULO SÉRGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

INFLUÊNCIA DA ESTIMATIVA DO GRADIENTE HORIZONTAL TROPOSFÉRICO NO POSICIONAMENTO GNSS DE ALTA ACURÁCIA

Presidente Prudente Junho de 2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

PAULO SÉRGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

INFLUÊNCIA DA ESTIMATIVA DO GRADIENTE HORIZONTAL TROPOSFÉRICO NO POSICIONAMENTO GNSS DE ALTA ACURÁCIA

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

> Dr. João Francisco Galera Monico (Orientador)

> > Dr. Luiz Fernando Sapucci (Coorientador)

Presidente Prudente Junho de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

De Oliveira Junior, Paulo Sérgio. D465i Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia / Paulo Sérgio de Oliveira Junior. -Presidente Prudente: [s.n], 2015 88 f. Orientador: João Francisco Galera Monico Coorientador: Luiz Fernando Sapucci Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia Inclui bibliografia 1. Posicionamento GNSS. 2. Alta acurácia. 3. Gradientes Horizontais Troposféricos. 4. Atraso Zenital. 5. Troposfera. I. De Oliveira Jr, Paulo Sérgio. II. Mônico, João Francisco Galera. III. Sapucci, Luiz Fernando IV. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. V. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Campus de Presidente Prudente

BANCA EXAMINADORA

3

Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO (ORIENTADOR)

Prof. Dr. HAROLDO ANTONIO MARQUES (UFPE)

Profa. Dra. DANIELE BARROCÁ MARRA ALVES

PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

Presidente Prudente (SP), 05 de junho de 2015.

Resultado: APWVADD

Faculdade de Ciências e Tecnologia Seção Técnica de Pós-Graduação Rua Roberto Simonsen, 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente SP Tel 18 3229-5318 fax 18 3223-4519 posgrad@fct.unesp.br

DADOS CURRICULARES

Paulo Sérgio de Oliveira Junior

Nascimento	22 de janeiro de 1990 – Rancharia – SP
Filiação	Paulo Sérgio de Oliveira Aparecida Pereira de Andrade Oliveira
2008 – 2012	Curso de Graduação Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP Campus de Presidente Prudente
2013 – 2014	Curso de Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP Campus de Presidente Prudente

DEDICATÓRIA

A Deus. Aos meus pais Paulo Sérgio e Aparecida (Fiika). A minha querida irmã, Thati.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me permitir ter vida e saúde para realização desse trabalho, e pela coragem e força em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Francisco Galera Monico, sempre uma referência que me motivou a seguir os caminhos da pesquisa científica e à quem hoje considero um grande amigo. Agradeço-lhe pela orientação, paciência, apoio e dedicação intensa às nossas atividades de pesquisa de modo geral.

Ao meu coorientador Dr. Luiz Fernando Sapucci, pelo suporte e valiosos ensinamentos transmitidos durante o período de estudos realizado no CPTEC/INPE.

A todos colegas e amigos do Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) pelo companheirismo, pelos momentos de reflexão e discussão sobre assuntos ligados aos nossos temas de pesquisa, mas também pelos momentos de descontração que tornaram o trabalho mais agradável.

À Profa Dra. Daniele Barroca Marra Alves, pela orientação nas atividades de estágio de docência junto à disciplina de Geodésia II, bem como nas atividades de iniciação científica ainda durante a graduação, o qual foi um período valioso de muito aprendizado.

Aos professores do PPGCC e do Departamento de Cartografía, muitos dos quais me acompanharam desde os estudos de graduação em Engenharia Cartográfica, proporcionando conhecimentos profissionais e valores éticos para a carreira e para a vida.

Aos funcionários da seção de pós-graduação pela dedicação, atenção e boa vontade em auxiliar que sempre tiveram com cada um de nós alunos do PPGCC.

Aos demais funcionários e servidores da FCT/Unesp, que de alguma forma empenham-se para nos proporcionar condições de estudo apropriadas, permitindo a realização deste e de tantos outros trabalhos nessa instituição.

A empresa ConsultGEL, pela oportunidade de integrar e realizar trabalho em conjunto com sua equipe o que possibilitou a realização de um dos experimentos dessa pesquisa.

Aos meus pais, Aparecida Pereira de Andrade e Paulo Sérgio de Oliveira que estiveram sempre ao meu lado. Agradeço-lhes pela educação, amor, carinho e ensinamentos recebidos, e sobretudo pelo apoio e encorajamento nos momentos difíceis.

À minha querida irmã Karin Thatiane de Oliveira, pelo carinho, amor e especialmente pelo seu alto astral sempre me transmitindo muita energia positiva e alegria.

Aos demais amigos e familiares que fizeram ou fazem parte da minha vida e que de certa forma contribuíram para minha formação como profissional e ser-humano.

RESUMO

A atmosfera terrestre é uma das principais fontes de erros na determinação de coordenadas no posicionamento pelo GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Para fins de posicionamento geodésico, a atmosfera terrestre pode ser dividida em duas camadas: a troposfera e a ionosfera. Destaca-se que tais camadas interagem de forma distinta com os sinais GNSS. Para mitigar os erros ocasionados por essas interações é necessário um tratamento específico para cada camada. A troposfera é a camada que se estende da superfície terrestre até, aproximadamente, 50 km de altitude. É um meio não dispersivo, ou seja, sua influência não depende da frequência dos sinais, e um de seus principais efeitos é o atraso troposférico. No contexto do processamento de dados GNSS, estima-se o ZTD (Zenith Tropospheric Delay), o qual pode ser subdividido em duas componentes principais: hidrostática e úmida. A componente úmida depende da temperatura e da densidade de vapor d'água, ao longo do caminho percorrido pelo sinal; já a componente hidrostática que é composta por gases secos, depende principalmente da temperatura e da pressão. Para mapear o atraso da direção do satélite para a zenital, funções de mapeamento são empregadas e para a assimetria azimutal existe a possibilidade de estimar os gradientes troposféricos. No entanto, ainda não há no meio científico um consenso sobre a adoção dos gradientes horizontais, uma vez que as vantagens da inserção desse parâmetro no tratamento de dados GNSS ainda não foram suficientemente evidenciadas. Esse contexto vem estimulando trabalhos recentes sobre a estimativa dos gradientes horizontais para fins de posicionamento ou mesmo para determinação do atraso devido à troposfera visando obter o PW (Precipitable Water - Água precipitável). Essa pesquisa tem como objetivo principal investigar a influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia no modo relativo para linhas de base longa. Para tanto, foram investigadas as melhorias em termos de repetibilidade na estimativa de coordenadas geodésicas quando se emprega a estimativa de gradientes horizontais troposféricos no posicionamento GNSS. Os estudos foram realizados sob as várias condições geográficas e atmosféricas existentes no Brasil, e em períodos de alta e baixa umidade do ar. Pode-se constatar que a adoção de gradientes horizontais troposféricos no posicionamento GNSS de alta acurácia permite melhorias de até 3,6 mm na repetibilidade da posição 3D, o que é relevante para aplicações como o monitoramento de deformações de estruturas onde a acurácia necessária é da ordem de poucos milímetros.

Palavras-Chave: Posicionamento GNSS, alta acurácia, Gradientes Horizontais Troposféricos, Atraso Zenital, Troposfera.

ABSTRACT

The Earth's atmosphere is one of the major sources of errors in the positioning by GNSS (Global Navigation Satellite Systems). The atmosphere is divided in terms of geodetic positioning in two layers, which interact in different ways with the GNSS signals, the troposphere and the ionosphere. To mitigate the errors caused by these interactions a specific treatment is required for each layer. The troposphere is the layer from the Earth's surface up to about 50 km altitude. It is a non-dispersive medium, that is, their influence does not depend on the frequency of the signals, and one of its main effects is the tropospheric delay. In the context of GNSS data processing, it is estimated the ZTD (Zenith Tropospheric Delay), which can be subdivided into two main components: the hydrostatic and the wet one. The wet component depends on the temperature and water vapor density, along the path described by the signal. As the hydrostatic component comprises dry gases, it depends mainly on the temperature and pressure. In order to model the ZTD vertical variation usually it is employed the functions known as mapping functions, and concerning the azimuthal asymmetry it is possible to estimate the horizontal tropospheric gradients. However, there is still no consensus in the scientific community about the advantages of the horizontal gradients estimation, since the insertion of this parameter in the treatment of GNSS data has not yet been clearly evidenced, either for positioning purposes or for estimating the delay to obtain the PW (precipitable Water - precipitable water). This research aims to investigate the influence of the estimate tropospheric horizontal gradient in the high accuracy GNSS positioning on relative mode involving long baselines. Therefore, we investigated the improvements in terms of repeatability in the estimation of geodetic coordinates when employing the tropospheric horizontal gradients estimated. The studies were conducted under various meteorological conditions in Brazil, in periods of high and low humidity. It could be seen that with the adoption of tropospheric horizontal gradients in the GNSS positioning allows improvements of up to 3.6 mm in the repeatability of the 3D position, which is important for applications such as monitoring of structural deformation where the required accuracy is the order of few millimeters.

Keywords: GNSS positioning, high accuracy, horizontal gradients tropospheric, Delay Zenith, Troposphere.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Simples Diferença – com simultaneidade das observações nos receptores 1 e 211
Figura 2 – Dupla Diferença
Figura 3 – Estações da RBMC em 201519
Figura 4 – Configuração Atual da Rede GNSS SP20
Figura 5 – Rede CIGALA/CALIBRA
Figura 6 - Divisão da troposfera em função da temperatura (meteorologia) e em função da
propagação de sinais eletromagnéticos (ionização)22
Figura 7 – Mapas do atraso troposférico oriundos de modelos de PNT do CPTEC/INPE28
Figura 8 – Satélites GNSS em diversos ângulos de elevação
Figura 9 - Receptor GNSS em presença de condições atmosféricas com deslocamento de
massa de ar úmido
Figura 10 – Gradientes horizontais troposféricos estimados para a ilha da Córsega
Figura 11 – Localização das redes experimentais de processamento
Figura 12 – UHE Lajeado – TO, Brasil
Figura 13 – Pilares e Referências de Nível na região da barragem da UHE Lajeado41
Figura 14 – Rede para processamento da referências de nível e dos pilares
Figura 15 - Exemplos de valores do vetor resultante das componente GE e GN do gradiente
horizontal troposférico
Figura 16 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas em E, N e Up do SGL (Sistema
Geodésico Local) para o período úmido com e sem estimativa do gradiente horizontal
troposférico na região sul
Figura 17 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas em E, N e Up do SGL para o
período seco com e sem a estimativa do gradiente horizontal troposférico na região sul46
Figura 18 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período úmido com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico
Figura 19 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico
Figura 20 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas em E, N e Up do SGL para o
período úmido com e sem a estimativa do gradiente horizontal troposférico na região centro-
oeste

Figura 21 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico na região centro-oeste
Figura 22 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período úmido com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico na região nordeste
Figura 23 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico na região nordeste
Figura 24 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período úmido com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico na região norte
Figura 25 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem
estimativa do gradiente horizontal troposférico na região norte
Figura 26 - Melhorias obtidas com adoção dos gradientes horizontais em cada região de
estudo54
Figura 27 - Comparação do impacto dos gradientes horizontais na repetibilidade das
coordenadas de todas as regiões de modo geral55
Figura 28 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RSUL durante todos os dias do
experimento
Figura 29 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RSUD durante todos os dias do
experimento
Figura 30 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RCENT durante todos os dias do
experimento
Figura 31 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RNORD durante todos os dias do
experimento
Figura 32 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RNORT durante todos os dias do
experimento
Figura 33 - EMQ das discrepâncias entre as coordenadas de cada passagem com relação à
solução final63
Figura 34 – Cartas do gradiente Horizontal para cada um dos dias do período úmido73
Figura 35 – Cartas do gradiente Horizontal para cada um dos dias do período seco

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Qualidade das efemérides precisas e erros dos relógios dos satélites GNSS 16
Tabela 2 – Estratégia de processamento no software Bernese 5.2
Tabela 3 – Estações utilizadas nos processamentos no BERNESE
Tabela 4 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego
do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região sul47
Tabela 5 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego
do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região sudeste48
Tabela 6 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas em E, N e Up
do SGL com emprego do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da
região centro-oeste
Tabela 7 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego
do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região nordeste52
Tabela 8 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego
do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região norte53
Tabela 9 – Comparativo entre os resultados de todas as regiões para os ganhos em milímetros
nas melhorias alcançadas com e sem a adoção dos gradientes horizontais
Tabela 10 - Percentual do erro total reduzido devido à adoção de gradientes horizontais
troposféricos
Tabela 11 - Resíduos e EMQ em relação a solução final sem o uso de gradientes horizontais
Tabela 12 – Resíduos e RMS em relação a solução final com o uso de gradientes horizontais

LISTA DE SIGLAS

Center for Orbit Determination in Europe	CODE
Differential Code Biases	DCB
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos	CPTEC
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	ECMWF
Erro Médio Quadrático	EMQ
Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema	GLONASS
Global Mapping Function GMF	GMF
Global Navigation Satellite System	GNSS
Global Positioning System	GPS
Inter-frequency bias	IFB
International GNSS Service	IGS
Instituto Nacional de Meteorologia	INMET
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	INPE
International Terrestrial Reference Frame	ITRF
International Terrestrial Reference System	ITRS
Integrated Water Vapor	IWV
Jet Propulsion Laboratory	JPL
Laboratório de Geodésia Espacial	LGE
Niell Mapping Function	NMF
Ocean Tide Loading	OTL
Previsão Numérica do Tempo	PNT
Posicionamento por Ponto Preciso	PPP
Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo	RBMC
Referência de Nível Profundo	RNP
Total Electron Contents	TEC
Translation, Editing, Quality Check	TEQC
Time Group Delay	TGD
Vienna Mapping Function 1	VMF1
Zenithal Hydrostatic Delay – Atrazo Zenital Hidrostático	ZHD
Zenithal Tropospheric Delay – Atraso Zenital Troposférico	ZTD
Zenithal Wet Delay – Atraso Zenital Úmido	ZWD

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	2
LISTA DE TABELAS	2
LISTA DE SIGLAS	2
1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Caracterização do assunto	4
1.2. Objetivos	5
1.3. Justificativa e motivação	6
1.4. Conteúdo do trabalho	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS GERAIS	8
2.1. Posicionamento pelo GNSS	8
2.1.1. Observáveis básicas do GNSS	8
2.1.2. Métodos de posicionamento GNSS para obtenção de posições de	acurácia
centimétrica ou milimétrica.	10
2.1.2.1 Posicionamento relativo	
2.1.2.2 Posicionamento baseado em redes	14
2.1.2.3 Posicionamento por Ponto Preciso	15
2.2 Sistemas de Controle Ativo existentes no Brasil	
2.3 Efeitos causados pela troposfera	21
2.4 Modelagem dos efeitos troposféricos	23
2.4.1 Modelo de Saastamoinen	24
2.4.2 Modelo de Hopfield	25
2.4.3 Modelos de Previsão Numérica do Tempo	
2.4.4 Funções de mapeamento	
2.4.5 Gradientes horizontais troposféricos	
3 MATERIAL E MÉTODOS	
3.1 Materiais empregados na pesquisa	
3.2 Métodos	
3.2.1 Estudo da estimativa dos gradientes horizontais em diferentes regiões do Bra	asil37

SUMÁRIO

	3.3.2 Avaliação da estimativa dos gradientes horizontais em aplicação prática	40
4	RESULTADOS E ANÁLISES	43
	4.1 Avaliação do comportamento do gradiente horizontal troposférico	43
	4.2 Análise do impacto do gradiente horizontal no posicionamento por região	45
	4.2.1 Resultados para a região sul	45
	4.2.2 Resultados para a região sudeste	47
	4.2.3 Resultados para a região centro-oeste	49
	4.2.4 Resultados para a região nordeste	50
	4.2.5 Resultados para a região norte	52
	4.2.6 Análise do impacto provocado pelos gradientes horizontais na repetibilidade	das
	coordenadas de todas as regiões	54
	4.2.7 Avaliação dos valores de qui-quadrado	56
	4.3 Análise da influência dos gradientes horizontais no posicionamento GNSS para fins	s de
	monitoramento de estruturas.	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	64
R	EFERÊNCIAS	66
A	PÊNDICE A - CARTAS DO GRADIENTE HORIZONTAL PARA CADA DIA	70

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do assunto

O GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) é composto por diversos sistemas de posicionamento por satélites, quer sejam os existentes (com as suas constelações completas), ou aqueles em desenvolvimento. No primeiro caso, têm-se o GPS (*Global Positioning System*) e o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*). Em desenvolvimento têm forte destaque o Galileo e o BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*), além de expansões do GNSS como o SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) e o GBAS (*Ground Based Augmentation System*) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008; ALVES et al., 2013).

No intuito de oferecer suporte as diversas aplicações do GNSS, vários métodos têm sido desenvolvidos para explorar a capacidade de tais sistemas em proporcionar informações de posição com alta acurácia (poucos milímetros ou centímetros). Nesse sentido, os efeitos da atmosfera terrestre têm sido um dos grandes desafios para os pesquisadores do mundo todo, pois consiste em uma das principais fontes de erro envolvidas no posicionamento e navegação com GNSS (FUND, 2009).

Em termos de propagação dos sinais eletromagnéticos, a atmosfera normalmente é dividida em duas camadas: a troposfera e a ionosfera, as quais interagem de diferentes maneiras com os sinais GNSS. Para minimizar os erros provocados por tais interações é necessário aplicar tratamentos diferentes para os efeitos de cada camada (SEEBER, 2003).

A ionosfera é um meio dispersivo, por outro lado a troposfera é um meio eletricamente neutro e não dispersivo de propagação dos sinais GNSS. O efeito de maior impacto provocado pela troposfera nos sinais GNSS é o atraso troposférico, o qual possui duas componentes principais, hidrostática e úmida.

Com relação à modelagem dos efeitos troposféricos é comum encontrar trabalhos que empregam o modelo modificado de Hopfield (SEEBER, 2003) ou o modelo de Saastamoinem (MENDES, 1998). Mesmo que seja comum estimar uma parte residual, ambos são modelos empíricos desenvolvidos com base em observações meteorológicas realizadas em um período relativamente curto, usando uma base de dados com coleta não homogênea sobre todo o globo, mais adequada no hemisfério norte e sobre regiões continentais. Como são baseados em médias globais, o maior prejuízo gerado pela utilização desses modelos é a perda de sensibilidade das variações diárias e anuais do atraso zenital troposférico (ZTD –

Zenith Tropospheric Delay). Uma possibilidade que vem sendo amplamente explorada pela comunidade científica são os modelos de PNT (Previsão Numérica de Tempo), com melhorias recentes os valores de ZTD oriundos de PNT têm sido empregados como alternativa aos modelos empíricos para mitigar os efeitos da troposfera nos sinais GNSS (SAPUCCI et al, 2008; ALVES & MONICO, 2011). Contudo, quando se tem longos períodos de coleta de observações GNSS é possível modelar apenas a componente hidrostática e estimar uma parte residual do ZTD, a componente úmida, com os demais parâmetros no ajustamento de observações GNSS. Assim, por meio dessas estimativas do atraso úmido é possível obter valores do vapor d'água atmosférico (PW - *precipitable water*), o qual é basicamente a quantidade de água precipitável em uma coluna atmosférica por unidade de área (SAPUCCI, 2005).

É comum assumir a atmosfera estratificada horizontalmente, ou seja que as variações do ZWD com relação ao azimute da direção observada não consideradas. De acordo com Ghoddousi-Fard (2009) o gradiente horizontal (ou vetor gradiente) é um vetor que indica o sentido e a direção de maior alteração no valor da componente úmida do atraso troposférico por unidade de espaço. Há diversos trabalhos sobre a modelagem do ZTD, bem como sobre as funções de mapeamento do mesmo (NIELL, 1996; SAPUCCI, 2004; FUND, 2009; BOEHM, et al 2006), porém não existe uma quantidade expressiva de estudos sobre os efeitos dos gradientes horizontais troposféricos em estimativas de ZWD e coordenadas a partir de observações GNSS (GHODDOUSI-FARD, 2009). Embora, para a maioria das aplicações, seja suficiente assumir que a atmosfera é subdividida horizontalmente em camadas e que a simetria azimutal é apropriada, a mesma pode introduzir significativos (3 à 7 mm) em medidas geodésicas com condições atmosféricas assimétricas (Emardson, 1998). Tal aspecto deve ser considerado nas aplicações em que alta acurácia é requerida. No contexto desse estudo, entende-se por alta acurácia, erros de ordem milimétrica ou de poucos centímetros. Nessas condições objetiva-se contribuir com a validação do uso dos gradientes horizontais no processamento de observações GNSS no Brasil.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar a influência dos gradientes troposféricos no posicionamento GNSS de alta acurácia no método relativo, sob diversas condições da atmosfera e situações geográficas existentes no Brasil. Visando atingir o objetivo geral, comparecem os seguintes objetivos específicos:

- Investigar as melhorias em termos de repetibilidade na estimativa de coordenadas geodésicas quando se emprega a estimativa de gradientes horizontais troposféricos no posicionamento GNSS;
- Automatizar a estimativa dos parâmetros da troposfera em software científico de processamento de dados GNSS no Laboratório de Geodésia Espacial (LGE) da FCT/Unesp (Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista);
- Realizar comparação entre as estimativas do gradiente horizontal troposférico em locais com diferentes características topográficas (regiões planas e acidentadas) e atmosféricas (climas seco e úmido);
- Avaliar a contribuição dos gradientes horizontais troposféricos em uma aplicação prática de monitoramento de deslocamentos, na qual o posicionamento GNSS de alta acurácia se faz necessário.
- Dar continuidade às investigações na linha de pesquisa GNSS/Meteorologia no Brasil e contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico do país.

1.3. Justificativa e motivação

Os gradientes horizontais troposféricos são parâmetros não suficientemente explorados na área GNSS/Meteorologia, e ainda não há consenso na literatura internacional de que adicioná-los como incógnita no ajustamento de observações GNSS pode trazer melhorias ao posicionamento GNSS de alta acurácia (GHODDOUSI-FARD, 2009; MOREL *et al*, 2014). Assim, essa pesquisa pode contribuir para determinar se os gradientes podem ser relevantes, e em caso afirmativo, em quais casos os mesmos devem ser considerados.

O LGE possui diversos pesquisadores envolvidos na estimativa de parâmetros troposféricos, visto que já foram desenvolvidas pesquisas a nível de iniciação científica, mestrado e doutorado nessa temática. Assim, a presente pesquisa de certa forma, deu continuidade a tais estudos. Além disso, estudos relacionados ao comportamento dos sinais GNSS na atmosfera terrestre sempre serão de fundamental importância para o aprimoramento e evolução dessa tecnologia, especialmente em um país com dimensões continentais como é o caso do Brasil.

1.4. Conteúdo do trabalho

A seguir é apresentada uma breve descrição da organização deste trabalho, o qual está dividido em 4 capítulos principais.

No primeiro capítulo são elencados os principais eixos da pesquisa, por meio da caracterização do assunto, da apresentação dos objetivos, bem como da motivação e justificativa que conduziram a escolha do tema.

No capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica, de modo que são descritas as principais características associadas ao conceito de posicionamento GNSS e aos métodos atuais. Apresenta-se uma breve descrição sobre os sistemas de controle ativos existentes no Brasil, da troposfera, dos efeitos que essa camada provoca nas observáveis GNSS, bem como dos aspectos teóricos envolvidos na modelagem de tais efeitos. Dessa forma, são apresentados alguns dos diversos modelos existentes para mitigação dos efeitos troposféricos e também são apresentados os parâmetros da troposfera à serem considerados no processamento, dentre eles o gradiente horizontal troposférico.

No capítulo 3 são descritos detalhadamente os materiais e métodos empregados para realização dos experimentos. Em seguida o capítulo 4 apresenta os resultados e análises dos estudos realizados. Em um primeiro momento, trata-se da avaliação do desempenho do posicionamento GNSS com e sem a estimativa dos gradientes horizontais, sob as variadas condições topográficas e atmosféricas presentes no território brasileiro. Em um segundo momento, avalia-se o desempenho do gradiente horizontal em uma aplicação na qual se faz necessária a alta acurácia no posicionamento pelo GNSS.

Para finalizar, o capítulo 5 apresenta as considerações finais acerca dos resultados e análises conduzidas na pesquisa, bem como metas e recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS GERAIS

Nesse capítulo será apresentada a revisão bibliográfica de assuntos relevantes para este trabalho, além de outros fundamentos teóricos gerais de interesse didático envolvidos com o tema posicionamento por satélites e modelagem atmosférica.

2.1. Posicionamento pelo GNSS

2.1.1. Observáveis básicas do GNSS

As principais observáveis do GNSS são as medidas de pseudodistância e fase da onda portadora. Sendo que, a primeira é basicamente a medida da distância entre o satélite e o receptor, sem correção do erro de sincronização dos relógios do satélite e do receptor, o que justifica a nomenclatura "pseudo". A equação da pseudodistância entre o satélite s e o receptor r é dada por (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; MARQUES 2012):

$$PD_{r}^{s} = \rho_{r}^{s} + c[dt_{r} - dt^{s}] + I_{r}^{s} + T_{r}^{s} + Orb^{s} + dm_{r}^{s} + b_{rLi} + b_{Li}^{s} + \varepsilon_{PD}_{r}^{s},$$
(1)

- PD_R^S medida da pseudodistância considerando-se a diferença entre o tempo t_r registrado pelo receptor no instante de recepção do sinal e o tempo t^s , registrado pelo satélite no instante de transmissão do sinal;
- ρ^s_r distância geométrica entre o satélite "s" no instante de transmissão e o
 receptor "r" no instante de recepção, em metros;
- *c* velocidade da luz no vácuo, em metros por segundo;
- *dt_r* erro do relógio do receptor, em segundos, em relação ao tempo GNSS no sistema de tempo do receptor;
- *dt^s* erro do relógio do satélite, em segundos, em relação tempo GPS, no sistema de tempo do satélite;
- I_r^s efeito causado pela ionosfera, em metros;
- T_r^s erro causado pela troposfera, em metros;
- dm_r^s efeitos de multicaminhamento ou sinais refletidos, em metros;
- Orb^s- erro de órbita (posição) do satélite;
- b_{rLi} atraso de hardware para o receptor;
- b_{Li}^s atraso de *hardware* para o satélite;

• $\varepsilon_{PD_r}^{s}$ - é o erro da medida de pseudodistância (ruído), em metros.

A fase de batimento da onda portadora, ou simplesmente fase da onda portadora, é uma observável muito mais precisa que a pseudodistância. De acordo com Monico (2008) a fase da onda portadora φ_r^s é igual a diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor (φ^s) e a fase do sinal gerado no receptor (φ_r), sendo ambas no instante de recepção. A equação (2) representa a fase da onda portadora em ciclos no instante de recepção do sinal no receptor (t_r).

$$\varphi_{r}^{s}(t) = f\left(\frac{\rho_{r}^{s} - I_{r}^{s} + T_{r}^{s} + Orb_{r}^{s} + dm_{r}^{s} + b_{rLi} + b_{Li}^{s}}{c}\right) + f_{i}(dt_{r} - dt^{s}) + \left[\varphi^{s}(t_{0}) - \varphi_{r}(t_{0})\right] + N_{r}^{s} + \varepsilon_{\varphi}_{r}^{s}.$$
(2)

Além dos termos já apresentados, comparecem na equação 2 os seguintes elementos:

- f_i frequência nominal da fase em hertz;
- N_r^s refere-se à ambiguidade da fase;
- $\varphi^{s}(t_0)$ fase inicial no satélite, em ciclos, correspondente à época de referência t_0 ;
- $\varphi_r(t_0)$ fase recebida no receptor, em ciclos, correspondente à época de referência t_0 ;
- $\varepsilon_{\varphi_r}^{s}$ erro residual devido aos efeitos não considerados no modelo e aleatórios, em ciclos.

De acordo com Monico (2008), os receptores efetuam a medida da parte fracional da portadora e realizam a contagem do número inteiro de ciclos que entram no receptor a partir do instante inicial do rastreio. O termo N_r^s caracteriza o número inteiro de ciclos entre a antena do satélite e a antena do receptor nesse instante (antes da primeira observação). Visto que N_r^s não é conhecido o mesmo deve ser estimado como parâmetro no ajustamento de observações.

As observáveis apresentadas pelas equações (1) e (2) estão sujeitas a várias fontes de erros e nem todos estão evidenciados nas equações. Normalmente, esses erros são subdivididos em quatro grupos principais de acordo com a fonte que provocou sua ocorrência: satélite, propagação do sinal, e receptor/antena e estação.

Do instante em que são emitidos pelos satélites GNSS até a chegada à antena do receptor, os sinais eletromagnéticos sofrem vários efeitos durante sua propagação na atmosfera terrestre. Os principais efeitos envolvidos na propagação dos sinais GNSS são: atraso troposférico, efeito ionosférico, e multicaminho. Sendo o primeiro objeto de estudo dessa pesquisa e, portanto, descrito em maiores detalhes nas seções 2.3 e 2.4.

2.1.2. Métodos de posicionamento GNSS para obtenção de posições de acurácia centimétrica ou milimétrica.

A acurácia é basicamente o grau de proximidade de uma grandeza medida, com relação a um valor considerado como verdadeiro ou de referência. De acordo com Monico *et al*, (2009), o conceito de acurácia envolve tanto tendência quanto precisão, sendo o primeiro relacionado aos erros sistemáticos e o último aos efeitos aleatórios. Logo, quando se refere ao termo acurácia já está implícita a consideração da precisão.

Nesse trabalho, considera-se posições de alta acurácia àquelas com qualidade milimétrica ou centimétrica. Dentre os principais métodos de posicionamento GNSS, os que atualmente proporcionam tal qualidade são o posicionamento relativo, o posicionamento baseado em redes e o PPP. Tais métodos são brevemente descritos nas próximas seções.

2.1.2.1 Posicionamento relativo

De acordo com Monico (2008), no contexto do posicionamento relativo empregam-se de modo geral as duplas diferenças (DD) de fase e/ou pseudodistâncias como observáveis básicas. As DDs por sua vez são formadas por simples diferenças (SDs).

As SDs podem ser formadas entre dois receptores, dois satélites ou duas épocas. Combinações usuais envolvem diferenças entre dois satélites, ou duas estações (MONICO, 2008). A SD entre dois receptores é apresentada na Figura 1. A ideia fundamental é que os dois receptores ($r_1 \ e \ r_2$) rastreiem simultaneamente os mesmos satélites, sendo que as SDs são formadas em relação a cada um deles. Importante observar que o satélite GNSS, no instante de transmissão dos dados recebidos em cada um dos receptores, não estará necessariamente na mesma posição no arco de passagem. Tal fato deve ser levado em consideração no modelo matemático.



Figura 1 – Simples Diferença – com simultaneidade das observações nos receptores 1 e 2.

Muitos dos erros são espacialmente correlacionados entre receptores rastreando um mesmo satélite simultaneamente. Geralmente, o grau de correlação entre os erros nos dois receptores é função do comprimento da linha de base. Isto acontece porque tais erros dependem do satélite ou porque são causados pela propagação na atmosfera e, portanto, comuns aos receptores se estes estão separados por uma distância (linha de base) curta. Normalmente, considera-se linha de base curta, aquelas de comprimento inferior à 20 km, porém dependendo das condições atmosféricas deve-se considerar distâncias ainda menores.

A maior vantagem da SD é que a maioria dos erros comuns ao satélite é cancelada como, por exemplo, o erro do relógio do satélite (dt^s), a fase inicial no satélite correspondente a época t_0 e o atraso causado no hardware do satélite. Além disso, os erros orbitais e os erros devido aos atrasos troposférico e ionosférico são altamente correlacionados para linhas de base curtas sendo, portanto, praticamente eliminados na SD. Por outro lado, os erros do relógio do receptor e o efeito de multicaminho não são cancelados na SD. Para as linhas de base longas (maiores que 20 km), os erros devido aos atrasos troposférico e ionosférico se tornam significantes quando comparados aos demais. Nesse caso, a refração troposférica pode ser modelada e a refração ionosférica pode ser reduzida pelo uso da combinação linear ion-free, somente possível com receptores de dupla frequência. Outras alternativas seriam adotar modelos ou simplesmente ignorar tais efeitos, o que pode deteriorar os resultados.

Os erros não modelados ou não totalmente eliminados são assumidos como de natureza aleatória, fazendo parte do resíduo da observação em questão. A SD da medida de pseudodistância é dada pela equação (3):

$$\Delta P D_{1,2}^{1} = \Delta \rho_{1,2}^{1} + c(dt_{r1} - dt_{r2}) + \Delta dm_{PD1,2}^{1} + \varepsilon_{PD_{SD}},$$
(3)

Com:

• Δ - sendo a simples diferença entre os receptores 1 e 2;;

•
$$\Delta \rho_{1,2}^1 = \rho_1^1 - \rho_2^1;$$

- $\Delta dm_{PD1,2}^1 = dm_{PD1}^1 dm_{PD2}^1;$
- dt_{r1} , dt_{r2} , representam os erros dos relógios dos receptores r1 e r2;
- $\varepsilon_{PD_{SD}}$ é o resíduo da SD da pseudodistância, em metros.

Analogamente, a SD para a fase da onda portadora é expressa da seguinte forma:

$$\Delta \varphi_{1,2}^{1} = \frac{f}{c} \left(\Delta \rho_{1,2}^{1} + \Delta d \rho_{1,2}^{1} + \Delta d m_{\varphi_{1,2}}^{1} \right) + f \left(dt_{r_{1}} - dt_{r_{2}} \right) + \Delta \varphi_{1,2}(t_{0}) + \Delta N_{1,2}^{1} + \varepsilon_{\varphi_{SD}}, \quad (4)$$

Sendo:

•
$$\Delta N_{1,2}^1 = N_1^1 - N_2^1 e$$

•
$$\Delta \varphi_{1,2}(t_0) = \varphi_1(t_0) - \varphi_2(t_0).$$

A DD é a diferença entre duas SDs. Envolve, portanto, dois receptores e dois satélites (MONICO, 2008), como é mostrado na Figura 2. A característica mais importante da DD é a eliminação dos erros dos relógios dos receptores. Como resultado, se os erros residuais são pequenos, as DDs das ambiguidades podem ser solucionadas como um valor inteiro. Os erros dos relógios dos receptores se cancelam completamente se as observações dos satélites são realizadas simultaneamente. Porém, o multicaminho não é eliminado na DD, pois depende da geometria entre o receptor e o satélite e das condições espaciais de reflexão do sinal na região onde está localizada a antena do receptor.



No caso da observação de pseudodistância, tem-se que a DD é dada por:

$$\Delta \nabla \rho_{1,2}^{1,2} = \Delta \nabla \rho_{1,2}^{1,2} + \Delta \nabla dm_{PD1,2}^{1,2} + \varepsilon_{PD_{DD}},$$
(5)

Sendo:

- ∇ caracteriza a diferença entre os satélites;
- $\Delta \nabla \rho_{1,2}^{1,2} = \Delta \rho_{1,2}^1 \Delta \rho_{1,2}^2;$
- $\Delta \nabla dm_{PD}^{1,2}_{1,2} = \Delta dm_{PD}^{1}_{1,2} \Delta dm_{PD}^{2}_{1,2}$.

Da mesma forma, para a medida de fase da onda portadora a DD é dada por (MONICO, 2008):

$$\Delta \nabla \varphi_{1,2}^{1,2} = \frac{f}{c} \left(\Delta \nabla \rho_{1,2}^{1,2} + \Delta \nabla dm_{\varphi_{1,2}}^{1,2} \right) + \Delta \nabla N_{1,2}^{1,2} + \varepsilon_{\varphi_{DD}} , \qquad (6)$$

Com:
$$\Delta \nabla N_{1,2}^{1,2} = \Delta N_{1,2}^1 - \Delta N_{1,2}^2$$

A acurácia obtida no posicionamento relativo é função da distância entre o usuário e a estação de referência (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

Segundo Seeber (2003) vários métodos foram desenvolvidos para explorar a capacidade do GNSS de prover coordenadas precisas. Os métodos que envolvem o conceito de posicionamento relativo são apresentados por Monico (2008) como sendo:

Estático

Método de posicionamento relativo que permite obter maior precisão (1,0 ppm a 0,1 ppm). Normalmente é empregado para medição de linhas de base longas, redes geodésicas,

tectônica de placas e etc. Nesse método o receptor permanece fixo rastreando os satélites por um período superior 20 minutos.

Estático rápido

Geralmente este método é empregado para estabelecer redes locais de controle, adensamento de redes, dentre outros. É realizada uma seção estática de curta duração (de 5 a 20 minutos). Sua precisão varia de 1 a 5 ppm para linhas de base curtas, dependendo das condições atmosféricas, multicaminho, além de outras fontes de erro.

Semi-cinemático

Também conhecido como *stop* & *go*, a ideia básica é que primeiro se determinam as ambiguidades para posteriormente se ocupar as estações de interesse durante um curto intervalo de tempo (poucos segundos ou até 5 minutos), suficiente para determinar as coordenadas do ponto de interesse (*stop*). Em seguida desloca-se para a próxima estação (*go*), sem perder a sintonia com os satélites. Em condições apropriadas a precisão é da mesma ordem que a do posicionamento relativo estático rápido e o comprimento da linha de base pode variar, mas de modo geral não é superior à 20 km.

Cinemático

Tem-se como observável fundamental a fase da onda portadora. Os dados desse tipo de posicionamento podem ser tratados em tempo real caracterizando o posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) ou posteriormente, no escritório (pós-processado). Geralmente, o nível de precisão alcançado é da ordem de 1~2 cm em planimetria e 1~5 cm para a componente altimétrica. No que se refere ao comprimento das linhas de base também limita-se em geral à 20 km, no entanto, pode haver redução ou ampliação desse limite de acordo com os níveis de atividade atmosférica (sobretudo no que concerne à ionosfera).

2.1.2.2 Posicionamento baseado em redes

A precisão obtida no posicionamento relativo, que utiliza apenas uma única estação de referência, é função dos erros atmosféricos e da distância entre o usuário (estação ou receptor móvel) e a estação de referência mais próxima. Quando mais de uma estação de referência é estabelecida, as estações podem ser utilizadas interativamente para modelar os erros

espacialmente correlacionados como, por exemplo, o atraso troposférico e o efeito ionosférico. Portanto, o posicionamento baseado em redes de estações de referência foi desenvolvido objetivando melhorar a acurácia, disponibilidade e confiabilidade no posicionamento e navegação (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

Outro diferencial desse conceito é o aumento considerável da distância entre as estações de referência e o receptor móvel, que no posicionamento relativo cinemático convencional, em especial RTK, é bastante limitada, menos de 20 km, variando, principalmente, conforme as condições ionosféricas (ALVES, 2008).

Uma rede pode ser composta de três a centenas de estações de referência ativas e a distância entre as mesmas pode variar de poucos a dezenas de quilômetros, ou mais (OMAR e RIZOS, 2003). Sendo que a qualidade das correções obtidas será dependente da geometria e da condição de densificação da rede em questão.

2.1.2.3 Posicionamento por Ponto Preciso

O posicionamento por ponto preciso ou simplesmente PPP (*Precise Point Positioning*) refere-se à obtenção da posição de uma estação com base em observações de pseudodistância ou fase da onda portadora, ou ambas, coletadas por receptores de simples ou dupla frequência, com efemérides precisas. Segundo Monico (2008), esse método tem apresentado grande potencialidade em aplicações que exigem um certo nível de acurácia (cm) e menor dispêndio computacional, haja vista que os tradicionais métodos de posicionamento baseados em redes costumam ser onerosos nesse sentido.

De acordo com as informações disponibilizadas na página do IGS a qualidade das efemérides precisas, bem como dos erros dos relógios dos satélites são apresentados na Tabela 1.

Órbitas GPS	Acurácia Posição/ Relógio	Latência	Intervalo Posição/ Relógio
Ultra rápida (predita)	~ 5 cm / ~3 ns	Tempo real	15 min.
Ultra rápida (observada)	~3 cm / ~150 ps	6 horas	15 min.
Rápida ¹	~2,5 cm / 75 ps	24 horas	15 min./ 5 min.
Final	~ 2,5 cm / 75 ps	12 a 18 (dias)	15 min./ 30 s ou 5 min.
GLONASS	~ 3 cm	12 a 18 (dias)	15 min.

Tabela 1 – Qualidade das efemérides precisas e erros dos relógios dos satélites GNSS.

Fonte: http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html - acesso em 04 de junho de 2015.

É importante frisar que o PPP em tempo real é atualmente factível graças aos esforços do IGS (*International GNSS Service*) através do grupo de trabalho *IGS Real-Time*, com a disponibilização de informações de alta qualidade para posição e relógio dos satélites GNSS em tempo real.

O modelo matemático do PPP para receptores de dupla ou tripla frequência é obtido considerando-se as equações linearizadas das observáveis de pseudodistância e fase da onda portadora. A equação linearizada da pseudodistância é dada por (MONICO, 2008):

$$E(\Delta PD_{ri}^{s}) = a_{r}^{s}\Delta X_{r} + b_{r}^{s}\Delta Y_{r} + c_{r}^{s}\Delta Z_{r} + c(dt_{r} - dt^{s}) + I_{r}^{s} + T_{r}^{s}$$
(3)

Na equação 3 tem-se que:

- Δ*PD^s_{rj}* é a diferença entre a pseudodistância observada entre o receptor r e o satélite s e o seu valor calculado em função dos parâmetros aproximados para a portadora L_j, com *j* = (1,2 e 5);
- a^s_r, b^s_r e c^s_r são coeficientes das derivadas parciais da distância geométrica com relação aos parâmetros aproximados;
- *c* trata-se da velocidade da luz no vácuo;

¹ O desvio-padrão do erro do relógio do satélite para a órbita Rápida é de aproximadamente 25 ps, enquanto para Final é na ordem de 20 ps.

- ΔX_r, ΔY_r, ΔZ_r e dt_r representam as quatro incógnitas do posicionamento (correções às 3 componentes das coordenadas aproximadas e ao erro do relógio do receptor, nessa ordem);
- dt^s é o erro do relógio do satélite GNSS, o qual é obtido a partir das efemérides ou dos arquivos de correções de relógio;
- I_r^s representa erro devido ao efeito ionosférico;
- T_r^s caracteriza o erro causado pela refração troposférica.

As equações de observação linearizadas da fase de batimento da onda portadora são apresentadas em Monico (2008) da seguinte forma:

$$E(\lambda_j \Delta \phi_{rj}^s) = a_r^s \Delta X_r + b_r^s \Delta Y_r + c_r^s \Delta Z_r + c(dt_r - dt^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda_j [\phi^s(t_0)_j - \phi_r(t_0)_j + N_{rj}^s]$$
(4)

sendo:

- Δφ^s_{rj} a diferença entre a fase observada entre o receptor r e o satélite s e o seu valor calculado em função dos parâmetros aproximados para a portadora L_j,
- λ_j o comprimento de onda da portadora L_j ,
- φ^s(t₀) e φ_r(t₀) são as fases da portadora geradas no satélite e no receptor em uma época de referência (t₀),
- N_{rj}^s representa a ambiguidade na portadora L_j .

Nas equações (3) e (4), tem-se observáveis nas frequências existentes no GNSS para cada um dos satélites rastreados em cada época. Sendo que, as observáveis de fase de batimento da onda portadora podem ser combinadas linearmente, reduzindo os efeitos de refração ionosférica (combinação *ion-free*). De forma análoga, é possível realizar este procedimento com as pseudodistâncias. Já o atraso devido a troposfera pode ser minimizado utilizando um dos vários modelos existentes em conjunto com alguma técnica de parametrização (MONICO, 2008).

Nos dias de hoje, há vários serviços de PPP on-line disponibilizados gratuitamente aos usuários, por instituições ligadas às atividades geodésicas, tais como o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o NRCan (*Natural Resources Canada*), dentre outros. Colocar FCT/Unesp

2.2 Sistemas de Controle Ativo existentes no Brasil

A realização do posicionamento relativo requer que o usuário disponha de no mínimo dois receptores GNSS. Porém, nos últimos anos essa necessidade tem diminuído significativamente uma vez que com a criação, expansão e densificação dos SCAs (Sistemas de Controle Ativos) os usuários podem usar como base as estações de tais sistemas. No Brasil, um forte exemplo de SCA é a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), que é coordenada pelo IBGE em parceria com mais de 50 instituições dentre as quais destaca-se a FCT/Unesp. Os dados das estações RBMC são disponibilizados gratuitamente, permitindo a realização do posicionamento relativo para usuários que não dispõem de mais de um receptor (MONICO, 2008). A Figura 3 mostra as estações da RBMC com a configuração atual, abrangendo todo o território nacional.



Figura 3 – Estações da RBMC em 2015

Fonte: ftp://geoftp.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/RBMC_2014.pdf

Os dados dessas estações são disponibilizados compactados em formato RINEX com intervalo de coleta de 15 segundos. Em junho de 2015 a RBMC conta com 121 estações, das quais 93 possuem dados disponíveis também para posicionamento em tempo real, disponibilizados via protocolo de Internet conhecido por NTRIP (*Networked Transport of*

RTCM via Internet Protocol), em formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*).

No estado de São Paulo, tem-se a Rede GNSS SP cofinanciada pela FAPESP (Fundação de Amparo à Tecnologia do Estado de São Paulo) e gerenciada pela FCT/Unesp. A Rede GNSS SP está em fase de expansão e densificação da sua área de cobertura, de modo a compreender todo o Estado de São Paulo. A Figura 4 apresenta a configuração atual composta de 20 estações GNSS. Observa-se que embora trate-se de uma rede considerada densa no contexto da América do Sul, as interdistâncias entre as estações variam de aproximadamente 100 à 300 quilômetros. Vale salientar também que a maioria das estações está inserida na RBMC.



Figura 4 - Configuração Atual da Rede GNSS SP

Fonte: http://www.fct.unesp.br/ - acesso em agosto de 2015.

Essa distribuição espacial das estações possibilita a realização de muitas aplicações, tais como: estudos atmosféricos, com destaque para o cálculo do atraso troposférico e dos valores de TEC, pesquisas de monitoramento das velocidades das placas tectônicas, estudo de séries temporais, georreferenciamento de informações espaciais, levantamentos cadastrais, agricultura de precisão, levantamentos topográficos e geodésicos, dentre outras possibilidades.

As estações da rede GNSS-SP possuem receptores GNSS de dupla ou tripla frequência (L1, L2 e L5), que coletam dados GNSS continuamente.

No que se refere aos estudos da cintilação ionosférica no Brasil, tem-se uma rede de apoio às pesquisas científicas com receptores de características específicas para monitoramento de irregularidades ionosféricas (Figura 5). Essa rede foi financiada pelos projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*). Maiores informações podem ser obtidas no seguinte endereço eletrônico: http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/index.php.



Fonte: http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/stations/fixed.php

2.3 Efeitos causados pela troposfera

Na Meteorologia, para fins de estudo e de modelagem, considera-se que a atmosfera é composta por diferentes camadas. A troposfera é a camada mais superficial e estende-se da superfície terrestre até aproximadamente 10 km de altura, seguida pela estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera (FUND, 2009).

De acordo com Seeber (2003), a divisão atmosférica em função da temperatura é largamente empregada na Meteorologia. Entretanto, a literatura científica sobre propagação dos sinais GNSS não faz diferença entre as duas primeiras camadas atmosféricas. Assim, a troposfera tal como descrita na Geodésia Celeste estende-se da superfície terrestre até uma altitude da ordem de 50 km (FUND, 2009). A Figura 6 apresenta essa divisão em contraste com aquela considerada pelas ciências meteorológicas.

Figura 6 – Divisão da troposfera em função da temperatura (meteorologia) e em função da propagação de sinais eletromagnéticos (ionização).



Os efeitos causados pela troposfera estão entre os principais fatores que afetam os métodos de posicionamento com uso do GNSS. Atualmente, são conhecidos diversos efeitos dessa camada nos sinais eletromagnéticos do GNSS, como por exemplo, a atenuação atmosférica, a cintilação troposférica e o atraso troposférico (SAPUCCI, 2004).

A atenuação atmosférica é basicamente uma redução na intensidade da onda eletromagnética provocada por elementos atmosféricos, sendo que é diferente para cada frequência. Para bandas entre 1 e 2 GHz, que é o caso do GNSS, a atenuação é principalmente devido ao oxigênio. Já a cintilação troposférica é uma oscilação em amplitude na onda eletromagnética causada por irregularidades e rápidas variações do índice de refratividade troposférico. Para pequenos ângulos de elevação e curtos intervalos de tempo, a atenuação e a cintilação troposférica podem ser significantes, mas para ângulos de elevação superiores a 5 graus e períodos relativamente longos, tais efeitos são muito pequenos, sendo frequentemente

negligenciados. Contudo, esse não é o caso do atraso troposférico, visto que o mesmo pode provocar erros elevados e que devem ser devidamente tratados para possibilitar a realização do posicionamento com alta precisão (SAPUCCI, 2004). Para tanto, o atraso troposférico é estimado na direção zenital sendo denominado ZTD (*Zenith Tropospheric Delay*), o que implica na necessidade da adoção de funções de mapeamento.

O atraso na propagação dos sinais GNSS devido à troposfera é separado em duas componentes: seca e úmida. A componente úmida (ZWD - *Zenith Wet Delay*) é descrita como uma função da temperatura e da densidade de vapor d'água ao longo do caminho percorrido pelo sinal. Já, a componente hidrostática (ZHD - *Zenith Hidrostatic Delay*), é composta por gases secos, variando principalmente em função da temperatura e pressão (MONICO, 2008; SAPUCCI, 2001). Assim:

$$ZTD = ZHD + ZWD \tag{5}$$

A componente hidrostática tem lenta variação temporal (1cm/6h), o que torna sua modelagem bastante precisa, em torno de \pm 1%, sua influência sobre o atraso total é grande e pode causar um atraso no zênite de até 2,3 m (SPILKER JR., 1996). Por outro lado, a componente úmida deve ser estimada, pois possui difícil modelagem devido a sua alta taxa de variação, aproximadamente 10% em poucas horas e causa um atraso de até 0,35 m no zênite. O erro provocado por ambas as componentes tem um aumento de aproximadamente 10 vezes no horizonte, considerando-se uma 10° de elevação (SEEBER, 2003). Abaixo de 10° têm-se um aumento de fatores tais como o multicaminhamento (SOUZA, 2004), além de outros efeitos atmosféricos à serem considerados. Se realizada modelagem apropriada, as observações coletadas abaixo de 10° de elevação também podem ser utilizadas e melhorariam o desempenho do posicionamento, sobretudo para a componente altimétrica (BOEHM et al, 2006).

2.4 Modelagem dos efeitos troposféricos

Nessa seção são elencados os modelos de correção dos efeitos troposféricos de maior destaque na literatura sobre GNSS. Dentre os quais tem grande destaque os modelos empíricos como Saastamoinen e Hopfield e a tendência geral nos últimos que tem sido o emprego dos modelos de previsão numérica de tempo (PNT).

2.4.1 Modelo de Saastamoinen

Saastamoinen desenvolveu um modelo baseado na suposição do decréscimo linear da temperatura até uma altura média de aproximadamente 12 km (tropopausa). Para alturas acima destas um valor constante caracteriza a estratosfera como um modelo isotérmico. Também adota-se uma atmosfera em equilíbrio hidrostático e que todo o vapor d'água se concentra na troposfera, de modo a comportar-se como um gás ideal. Com relação à pressão parcial do ar seco e do vapor d'água foram adotadas equações exponenciais, pois os valores crescem quando a pressão total da troposfera cresce, porém muito mais rapidamente. O modelo proposto por Saastamoinen com alguns refinamentos é apresentado pela expressão (5) (SAASTAMOINEN, 1972; MONICO, 2008; HOFMANN-WELLENHOF, 2008).

$$ZTD_r^s = 0.002277(1+D)^{-1}\sec z \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05\right)e - Btan^2 z\right] + \partial_R, \tag{6}$$

onde:

- P é a pressão total barométrica em milibares;
- *e* caracteriza a pressão parcial do vapor d'água em milibares;
- *T* é a temperatura absoluta em graus Kelvin ($T = 273, 2 + t \,^{\circ}C$, com *t* sendo a temperatura em graus celsius)
- B e ∂_R são fatores de correção dependentes da altura da estação e do ângulo zenital (HOFMANN-WELLENHOF, 2008);
- z é a distância zenital verdadeira corrigida pela subtração do ângulo de refração (Δz)

O ângulo zenital (z) e o valor de *D* são obtidos das expressões (7) e (8), respectivamente:

$$z = 90^{\circ} - E \tag{7}$$

$$D = 0,0026 \cdot \cos 2\phi + 0,00028H , \qquad (8)$$

sendo H a altitude ortométrica da estação, E o ângulo de elevação e ϕ a latitude do local.
2.4.2 Modelo de Hopfield

O modelo para obter o atraso troposférico desenvolvido por Hopfield supõe que a refratividade atmosférica é dada em função dos valores de temperatura e pressão, medidos na superfície, e da altura da camada atmosférica que exerce influência na propagação dos sinais eletromagnéticos. Esse modelo é dado pelas seguintes equações (SAPUCCI, 2001; SEEBER, 2003):

$$ZHD = 155,2 \times 10^{-7} \frac{P_0}{T_0} H_h, \tag{8}$$

$$ZWD = 155.2 \times 10^{-7} \frac{4810e_0}{T_0^2} H_w, \tag{9}$$

onde:

- O índice "₀" indica medidas efetuadas na superfície. Como anteriormente, P caracteriza a pressão atmosférica total (em hPa), e a pressão parcial de vapor d'água (em hPa), e T a temperatura (em Kelvins).
- Os termos H_h e H_w correspondem às alturas das camadas atmosféricas das componentes hidrostática (ZHD) e úmida (ZWD), respectivamente, em unidades métricas, dadas por:

$$H_h = 40136 + 148,72(T_0 - 273,16), \tag{10}$$

$$H_w = 11000m$$
 (11)

No entanto, segundo Sapucci (2001), o valor apresentado pela equação (11) se refere aos locais próximos ao Equador, uma vez que, para locais próximos aos polos esse valor pode ser de 7000 m. Com base nessa informação, é possível realizar uma correção, considerando a taxa de variação de H_w constante em relação às variações de latitude do local. Assim, pode-se escrever:

$$H_w = 11000 - 44,44\varphi. \tag{12}$$

2.4.3 Modelos de Previsão Numérica do Tempo

O modelo de PNT relaciona diversas grandezas da Meteorologia, que possuem forte correlação. Seu princípio é simples: conhecendo-se as leis de evolução do estado da atmosfera, pode-se calcular o seu estado futuro no instante t, se é conhecido o seu estado inicial no instante t_0 . No entanto, a complexidade dos modelos para a obtenção das previsões é elevada e exige alta capacidade computacional (SAPUCCI, 2003).

O atraso troposférico é a diferença entre a trajetória percorrida pelo sinal (S) e a trajetória geométrica entre o satélite e a antena do receptor (S_g), e é expresso pela equação (13) (SAPUCCI, 2001):

$$ZTD = S - S_g = (10^{-6}) \int N_T ds,$$
(13)

com:

$$N_T = (n-1) \times 10^{-6} \tag{14}$$

Onde N_T representa a refratividade troposférica e *n* trata-se do índice de refração.

Com o emprego das funções de mapeamento, as variações do ZTD em qualquer direção podem ser tratadas na direção zenital, portanto, considera-se apenas a concentração dos gases na coluna vertical da atmosfera. Assim, pode-se considerar a refratividade atmosférica como uma função da temperatura (T), da densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h). Dessa forma, obtêm-se a equação (14) (SPILKER Jr., 1996):

$$ZTD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} K_1 R_h p df + \int_{h_0}^{\infty} \left(K_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + K_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh, \qquad (15)$$

na qual: $R_h = 278,0538 Jkg^{-1} K^{-1}$ é a constante específica para os gases hidrostáticos; Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água; $K_1 = 77,60 KhPa^{-1}$, $K'_2 = 22,10 KhPa^{-1}$, e $K'_3 = 373900 KhPa^{-1}$, são as constantes de refratividade da atmosfera, determinadas experimentalmente (BEVIS et al., 1994).

O atraso hidrostático *ZHD* é dado apenas em função da densidade do ar atmosférico, que pode ser determinado a partir de medidas de pressão à superfície (P_s) em hPa, da latitude local (φ) e da altitude (H_s) dada em km. Assim, o atraso hidrostático é dado pela seguinte expressão (15) (DAVIS et al., 1985):

$$ZHD = (2,27683157 \times 10^{-3}) \frac{P_s}{1 - 0,0026cos2\varphi - 0,00028H_s}$$
(16)

A qualidade das medidas de pressão atmosférica determinará a precisão dos valores obtidos para o atraso hidrostático com a equação (15), que para barômetros com precisão de 0,5 *hPa* é de 1mm (SAPUCCI, 2003).

A segunda parcela da equação (14) recebe os valores das variáveis prognósticas preditas pelo modelo de PNT, desta forma, através de integração numérica, é possível obter os valores do atraso zenital troposférico da componente úmida nos mesmos intervalos em que o modelo numérico gera as predições.

O CPTEC (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos) pertencente ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) disponibiliza para a comunidade geodésica brasileira as predições do ZTD obtidas com um modelo de PNT derivado do modelo global do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) dos Estados Unidos da América (EUA). Primeiramente, foi desenvolvida uma versão com resolução espacial horizontal de 100x100km e 18 níveis verticais. Desde então o modelo passou por diversas atualizações e recentemente, o CPTEC disponibilizou uma nova versão com resolução espacial de 15x15km (19 níveis verticais _ confirme) cada três horas e previsões а (http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/).

Na página do CPTEC também é possível visualizar mapas da América do Sul e a representação da intensidade do atraso troposférico total para cada uma de suas componentes (seca e úmida) sobre o subcontinente obtidos com o modelo de PNT (Figura 7).





Fonte: http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/

Na Figura 7a é possível notar que, como esperado, os valores do atraso zenital úmido apresentam-se extremos sobre a região amazônica onde há alta quantidade de vapor d'água devido às elevadas temperaturas e a presença de grandes rios nessa região. Do mesmo modo, observa-se menor influência do ZWD na Cordilheira dos Andes, onde há uma quantidade muito menor de vapor d'água em virtude do frio e menor presença de rios. Já na Figura7b verifica-se o campo dos valores da componente seca. Na região andina é perceptível a menor influência do ZHD, visto que, em elevadas altitudes a densidade dos gases secos também é muito baixa. As características observadas na Figura 7a e na Figura 7b demonstram a coerência dos valores de ZWD e ZHD oferecidos pelo CPTEC/INPE com a realidade física. Finalmente, a Figura 7c mostra o campo das medidas do ZTD, que é formado pelo somatório dos valores ilustrados na Figura 7a e na Figura 7b.

A superfície de ZTD verificada na Figura 7c apresenta a união das características presentes para o ZWD e o ZHD. No entanto, com mais influência da componente seca, a qual é responsável pela maior parte (erro de maior magnitude) do atraso troposférico (SAPUCCI, 2001).

2.4.4 Funções de mapeamento

No contexto do processamento de dados GNSS, uma função de mapeamento é basicamente um modelo matemático usado para relacionar uma medida ou parâmetro estimado com o seu ângulo de elevação do satélite, de modo a possibilitar a transformação dessa medida ou parâmetro entre as direções inclinada (satélite-receptor) e zenital.

O atraso troposférico sofre um aumento em suas duas componentes quando o ângulo de elevação do satélite GNSS diminui. Isto ocorre devido à curvatura da terra e também à curvatura do caminho do sinal GNSS propagando-se pela atmosfera (MONICO, 2008). A Figura 8 ilustra de forma exagerada tal situação.



Figura 8 - Satélites GNSS em diversos ângulos de elevação

Desse modo, para obter os valores do atraso troposférico na direção zenital é necessário empregar uma função matemática. Em geral, essas funções são baseadas em frações continuas, como uma função do seno do ângulo de elevação, e os coeficientes a, b e c, associados com variações do ZTD (MARINI,1972):

$$mf(E, a, b, c) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\frac{a}{sen(E) + \frac{a}{sen(E) + c}}}$$
(17)

Como o ZTD é dividido em atrasos hidrostático e úmido, se faz necessário o uso de diferentes grupos de coeficientes (a_h, b_h, c_h) e (a_w, b_w, c_w) , onde os subscritos "*h*" e "*w*" denotam as componentes hidrostática e úmida, respectivamente. Assim, o atraso zenital troposférico é dado pela equação 17:

$$ZTD(E) = mf_h(E, a_h, b_h, c_h)ZHD + mf_w(E, a_w, b_w, c_w)ZWD,$$
(18)

onde: $mf_h(.)$ e $mf_w(.)$ representam as funções de mapeamento para as componentes hidrostática e úmida, cuja forma geral é apresentada na equação 16.

Dentre as funções de mapeamento mais conhecidas comparecem as de Marini (Marini, 1972); Lanyi (Lanyi, 1984 apud Sapucci, 2001); e Davis (Davis et al., 1993). Tais funções possuem uma acurácia limitada devido à dependência da temperatura da superfície terrestre. As funções de mapeamento de Niell (NMF – *Niell Mapping Functions*) (Niell, 1996) não possuem este problema. Em contrapartida, a NMF foi determinada com base em um ano de medidas com radiossondas de perfis atmosféricos no hemisfério Norte, e a variabilidade espacial e temporal é dependente apenas da latitude e da sazonalidade (NIELL, 1996). Essa abordagem empírica simplifica consideravelmente o processo de estimativa dos parâmetros envolvidos. As funções de mapeamento baseadas em dados de modelos de PNT, para determinação dos coeficientes (a, b, c), como a Isobárica (IMF – *Isobaric Mapping Function*) (NIELL e PETROV, 2003), a VMF (*Vienna Mapping Function*) (BOEHM e SCHUH, 2004), a VMF1, uma atualização da VMF (BOEHM et al., 2006) e sua versão global com menor resolução a GMF (*Global Mapping Function*), superam tais limitações.

2.4.5 Gradientes horizontais troposféricos

É notável a presença de uma grande quantidade de trabalhos na bibliografia sobre GNSS que tem se concentrado nas estimativas e predições do ZTD, bem como suas funções de mapeamento. No entanto, de acordo com Ghoddousi-Fard (2009), ainda há poucos estudos dedicados aos efeitos dos gradientes atmosféricos em estimativas derivadas de observações GNSS e no próprio posicionamento. Isso ocorre, pois para a maioria das aplicações é suficiente assumir que a atmosfera é subdividida horizontalmente em camadas de intensidade uniforme, ou seja que não é relevante considerar as variações azimutais.

Sabe-se porém que ao mapear o atraso troposférico estimado na direção zenital para uma determinada direção inclinada, o valor mapeado não pode ser considerado igual para todas as direções (Figura 9). Sobretudo, no que concerne à componente úmida, haja vista a grande variabilidade desta componente devido aos deslocamentos rápidos de massa de ar úmido.

O atraso troposférico estimado em uma determinada época pode ter um valor diferente para direções distintas ao ser projetado em uma direção inclinada, ainda que essas direções possuam o mesmo ângulo de elevação, devido à heterogeneidade das condições meteorológicas nos trajetos percorridos pelos sinais de diferentes satélites. A Figura 9 visa ilustrar tal situação, onde embora os atrasos trospoféricos para componente úmida na direção inclinada (*SWD – Slant Wet Delay*) para os satélites 1 e 2 tenham o mesmo ângulo de elevação, quando mapeados para a direção zenital serão representados por um único valor de *ZWD*. Dessa forma, a estimativa de gradientes horizontais pode melhorar a modelagem dos efeitos troposféricos no processamento de dados GNSS.





Segundo Meindl et al (2004), as observações com ângulos de elevação inferiores à 15° são essenciais para melhorar a acurácia das soluções GNSS, em particular para decorrelacionar as alturas estimadas para estações e correções ao atraso zenital troposférico. Sabendo-se que a ordem de grandeza dos gradientes horizontais é maior para baixos ângulos de elevação, nesses casos haverá maior probabilidade de melhorias no posicionamento GNSS.

Quando se leva em consideração a não simetria azimutal, a representação do ZTD com os parâmetros dos gradientes troposféricos, nas direções norte (*GN – Gradient North*) e leste (*GE – Gradient East*), é dada pela expressão 18 (GHODDOUSI-FARD, 2009; HERRING et al, 2010):

$$ZTD_{(E,Az)} = ZHDmf_h(E) + ZWDmf_w(E) + mf_g(E)(GN\cos(Az) + GE\sin(Az)),$$
(19)

sendo que o termo *E* representa o ângulo de elevação do satélite, *Az* denota o azimute do satélite, e mf_g a função de mapeamento para os gradientes troposféricos, dada pela equação (19) (CHEN & HERRING, 1997).

$$mf_g = \frac{1}{(sin(E)tan(E)+C)}$$
(20)

onde, de acordo com Chen e Herring (1997), C pode ser considerado constante e equivalente a 0,0032. Seu valor afeta a função de mapeamento apenas para ângulos de elevação muito baixos, onde cos(E), é aproximadamente 1. Porém, o autor evidencia que valores diferentes para C podem ser determinados de acordo com o valor da refratividade atmosférica e da altura da estação.

Considerando-se as equações de pseudodistância e de fase da onda portadora pode-se exemplificar a matriz design e o vetor dos parâmetros à serem no posicionamento GNSS com um receptor isolado (PPP, por exemplo) com a seguinte configuração quando os gradientes horizontais são estimados:

$$E\left\{ \begin{bmatrix} \Delta P D_{rL_{i}}^{Sj} \\ \lambda_{Li} \phi_{L_{i}}^{Sj} \end{bmatrix} \right\} = AX = \begin{bmatrix} -\frac{(X^{Sj} - X_{r}^{0})}{(\rho_{r}^{Sj})^{0}} & -\frac{(Z^{Sj} - Z_{r}^{0})}{(\rho_{r}^{Sj})^{0}} & 1 & mf_{w}(E) & mf_{g}sin(Az) & mf_{g}sin(Az) & 0 \\ -\frac{(X^{Sj} - X_{r}^{0})}{(\rho_{r}^{Sj})^{0}} & -\frac{(X^{Sj} - X_{r}^{0})}{(\rho_{r}^{Sj})^{0}} & 1 & mf_{w}(E) & mf_{g}cos(Az) & mf_{g}sin(Az) & \lambda_{Li} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{r} \\ \Delta Y_{r} \\ \Delta Z_{r} \\ cdt_{r} \\ ZWD \\ GE \\ GN \\ N_{Li}^{Sj} \end{bmatrix}$$

$$(21)$$

Onde:

- $E\{.\}$ caracteriza o operador de esperança matemática;
- $\lambda_{Li}\phi_{L_i}^{Sj}$ diferença entre a fase observada e a calculada (vetor L para fase), em metros;
- $\Delta PD_{rL_i}^{Sj}$ diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para a pseudodistância), em metros;
- (ρ_r^{Sj})⁰ distância gemétrica (satélite receptor) calculada em função dos parâmetros aproximados, em metros;
- $X^{S_j}, Y^{S_j} \in Z^{S_j}$ representam as coordenadas, em metros, do satélite GNSS *j*;
- $X_r^0, Y_r^0 \in Z_r^0$ representam as coordenadas aproximadas do receptor GNSS r.

Considerando-se que as três primeiras colunas da matriz possuem os cossenos diretores para o vetor satélite receptor, pode-se inferir que todos os coeficientes da matriz A devem ter valores iguais ou inferiores a 1.

O sistema de equações apresentados em (20) que corresponde ao posicionamento de um receptor isolado, pode ser propagado para o método relativo desenvolvendo-se as duplas e simples diferenças das equações de observação. Porém, em ambos os casos a inserção dos gradientes horizontais adiciona dois parâmetros à serem estimados no ajustamento, o que reduz os graus de liberdade. Além disso, assim como para o atraso troposférico correspondente à componente úmida, o processo mais indicado para modelar os gradientes horizontais troposféricos é o chamado *random walk* (Blewitt, 1998; Sapucci, 2001). O qual é caracterizado principalmente pelo aumento da incerteza dos parâmetros ser proporcional à raiz quadrada do intervalo de tempo entre as épocas de processamento.

Para exemplificar o comportamento dos gradientes horizontais troposféricos, a Figura 10 apresenta os valores desse parâmetro estimados para estações GNSS sobre a ilha da Córsega, localizada no Mar Mediterrâneo, ao sul da França onde observou-se coerência dos vetores resultantes das componentes nas direções norte e leste, com as variações do relevo na região (OLIVEIRA JR, et al 2013). Isso ocorre, pois as massas de ar úmido vindas do oceano se concentram nos entornos da superfície rochosa ocasionando um aumento da pressão parcial de vapor d'água nessas regiões. Essa situação é geralmente verificada na direção do gradiente horizontal troposférico.



Figura 10 – Gradientes horizontais troposféricos estimados para a ilha da Córsega Fonte: OLIVEIRA JR, et al (2013)

Dentre os trabalhos mais recentes envolvendo a estimativa de gradientes horizontais destacam-se Sguerso et al (2013) que conduziu estudos de 14 anos de estimativa dos gradientes troposféricos utilizando 181 estações GNSS localizadas entre a Itália e a França na região dos Alpes. Os resultados detectaram que alterações de hardware e software geram relativa influência nas estimativas dos parâmetros relacionados à troposfera, além disso o estudo enfatiza a contribuição desses parâmetros para o estudo do clima. Morel et al (2014) discute o significado físico de gradientes horizontais estimados durante todo o ano de 2011 em estações GNSS pertencentes ao IGN (*Institut Géographique National*) na ilha da Córsega

localizada no Mar Mediterrâneo. Nesse estudo foi observada concordância entre gradientes horizontais obtidos através de diferentes softwares e em diferentes métodos de posicionamento (posicionamento relativo e PPP). No que se refere ao emprego dos gradientes horizontais para aplicações meteorológicas, Li et al (2015) evidenciou o potencial dos gradientes horizontais troposféricos obtidos com alta resolução para melhorias nos modelos de previsão numérica de tempo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os principais materiais e métodos empregados para atingir os objetivos gerais e específicos da presente pesquisa são apresentados nesse capítulo.

3.1 Materiais empregados na pesquisa

Para realização de todos os estudos foi utilizado o software científico de processamento de dados GNSS conhecido como BERNESE GPS software 5.0, bem como a sua nova versão recentemente adquirida pelo LGE, o BERNESE GNSS software 5.2.

O BERNESE é dedicado exclusivamente ao processamento de dados GNSS, e foi concebido e desenvolvido pelo Instituto Astronômico da Universidade de Berna, Suíça. Dentre as principais características do BERNESE destacam-se sua capacidade de proporcionar resultados acurados, flexibilidade no processamento, rotinas robustas para automação. Além disso, sua estrutura obedece a linha de padrões adotados internacionalmente pelos centros de processamento e análise do IGS (DACH et al., 2011).

O software BERNESE possui diversas potencialidades: determinação de coordenadas, geração de estimativas dos parâmetros de troposfera e ionosfera, solução do vetor das ambiguidades, determinação de velocidade das estações, estimativa do centro de massa da Terra, dentre outras (DACH et al., 2011). Considerando-se que todas as rotinas do software BERNESE são disponibilizadas, é válido ressaltar que uma vez adquirido o software é possível realizar alterações ou adicionar novas funcionalidades.

No que concerne as observações GNSS, foram empregados os dados da RBMC disponibilizados pelo IBGE, cujas estações estão presentes em todas as regiões do território brasileiro conforme apresentado na seção 2.2. Além dos dados GNSS da RBMC, foram utilizadas as soluções finais de órbitas e correções de relógio do IGS (*International GNSS Service*).

Para facilitar o tratamento de vários dias de dados envolvendo várias estações de referência foi necessário o desenvolvimento de *scripts* em *shell* (*.sh) e korn shell (*.ksh) para execução em ambiente LINUX. Tais *scripts* possibilitaram otimizar os processamentos bem como automatizar diversas operações. Além disso, vale a pena destacar que foram empregados programas matemáticos e/ou estatísticos existentes, tais como Matlab, GNUPLOT e o GMT *package* (*Generic Mapping Tools*) associados aos *scripts* implementados para realizar as análises.

3.2 Métodos

Nessa seção são descritos os métodos empregados para o estudo da estimativa dos gradientes horizontais. Dois experimentos principais foram conduzidos e os resultados correspondentes são apresentados no capítulo 4.

3.2.1 Estudo da estimativa dos gradientes horizontais em diferentes regiões do Brasil

Nesse estudo, procurou-se realizar experimentos que abrangessem o comportamento do gradiente horizontal no território nacional explorando-se as diferentes características regionais do Brasil.

Para tanto, foram criadas cinco (5) campanhas de processamento de dados GNSS no software BERNESE 5.2, de modo que considerou-se redes locais de processamento compostas por estações da RBMC em cada uma das regiões geográficas brasileiras: Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul. A Figura 11 apresenta a localização aproximada de cada uma dessas redes locais. Foram selecionadas cinco estações por região, e as estratégias de processamento são apresentadas na Tabela 2. Como os gradientes horizontais estão mais associados à umidade, procurou-se avaliar dois períodos por região: seco e úmido.

Parâmetro	Descrição
Intervalo das observações	15 segundos
Produtos orbitais	IGS finais / precisos
Modelo de cargas oceânicas	FES 2004 (Finite Element Solution – 2004)
Reference frame	ITRF2008
Máscara de elevação	5 graus
Ionosfera	<i>Quasi-ionospheric free</i> (L3) - solução das ambiguidades
Função de mapeamento	GMF
Desvio padrão para aplicado às coordenadas das estações injuncionadas	Variando de 1 à 2 cm, de acordo com a precisão divulgada para as coordenadas SIRGAS-CON
Modo de processamento	Relativo

Tabela 2 – Estratégia de processamento no software BERNESE 5.2



Figura 11 - Localização das redes experimentais de processamento

As nomenclaturas das campanhas para cada uma das regiões, bem como as estações envolvidas no processamento são apresentadas na Tabela 3. Para cada rede foram injuncionadas duas estações, que consequentemente provém o datum para a solução final. As estações à serem injuncionadas foram escolhidas de forma que houvesse boa geometria das linhas de base. No entanto é importante frisar que as injunções são aplicadas apena à solução final no modulo ADDNEQ. Para o peso da injunção considerou-se as informações de precisão das coordenadas provenientes da solução multianual do processamento da rede SIRGAS-CON, ITRF2008 (*International Terrestrial Reference Frame – 2008*), na época da campanha.

Região	Nomenclatura da campanha	lenclatura daEstações envolvidas nopanhaprocessamento		
Sul	RSUL	POAL, SMAR, UFPR SCCH, SCLA	UFPR, POAL	
Sudeste	RSUD	PPTE, SJRP, OURI, CHPI, RIOD	PPTE, CHPI	
Centro-oeste	RCENT	BRAZ, GOJA, MTSF CUIB, MTCN	BRAZ, CUIB	
Nordeste	RNORD	PEPE, PISR, BAIR, BOMJ, SAVO	PISR, SAVO	
Norte	RNORT	AMCO,BOAV,NAUS, PAIT, PAST	BOAV, NAUS	

Tabela 3 – Estações utilizadas nos processamentos no BERNESE

Ao todo foram processadas quatro semanas de observações para cada região, sendo duas semanas contínuas durante o período seco e duas no período úmido. A Tabela 4 apresenta tais períodos (dias do ano) selecionados para avaliação do impacto do gradiente horizontal no posicionamento GNSS. Com exceção da estação PAIT cujos dados não estavam disponíveis para o período seco, os dados de todas as estações estiveram disponíveis durante os dias dos experimentos.

Tabela 4 – Períodos selecionados para avaliação do impacto do gradiente horizontal no posicionamento

	Período úmido	Período Seco
Semana 1	001/2014 - 007/2014	183/2014 - 190/2014
Semana 2	008/2014 - 014/2014	191/2014 - 197/2014

Além da avaliação do impacto do gradiente horizontal em diversas redes locais no Brasil, também foi realizado no decorrer da pesquisa um experimento no qual avaliou-se o impacto de gradientes horizontais estimados em janelas de 5 horas de observação para a determinação de coordenadas de alta acurácia tendo vista aplicação de monitoramento estrutural em que a alta acurácia se faz extremamente necessária. Como *inputs* para o processamento é importante lembrar que além dos dados RINEX, e das orbitas precisas IGS, também foram empregados os arquivos de DCBs do CODE, os arquivos de cargas atmosféricas e os parâmetros do modelo de cargas oceânicas.

3.3.2 Avaliação da estimativa dos gradientes horizontais em aplicação prática

Uma das aplicações GNSS que exige alto nível de acurácia (milímetros) é o monitoramento de grandes estruturas, dentre as quais as barragens tem forte destaque. Haja vista que, em muitos casos pode haver áreas habitadas com centenas ou milhares de pessoas à jusante. Além dos prejuízos materiais, o rompimento de uma estrutura desse nível pode acarretar em perdas de vidas humanas o que caracteriza um dano irreparável.

Nesse sentido, a legislação que norteia a manutenção e segurança das usinas hidroelétricas (UHE) no Brasil tem sido cada vez mais rigorosa. Uma das primeiras usinas hidroelétricas do país a realizar efetivamente o controle de estruturas por técnicas de levantamento GNSS é a UHE Lajeado, localizada no munícipio de Lajeado-TO (Figura 12).



Figura 12 – UHE Lajeado – TO, Brasil.

Esse projeto de mestrado contribuiu na etapa de levantamento de uma das campanhas e na definição da estratégia de processamento para linhas de base longas no software BERNESE 5.0. O que tornou-se uma oportunidade para avaliar a eficiência dos gradientes horizontais em uma aplicação prática, na qual a alta acurácia é de grande relevância.

Para realizar o posicionamento dos marcos localizados na estrutura da barragem, se faz necessário determinar as coordenadas de uma rede local de monitoramento. No caso da UHE Lajeado essa rede é composta por três pilares e duas RNPs (Referências de Nível Profundo) localizadas nos extremos da barragem (Figura 13).





A estratégia de processamento para as RNPs e os Pilares na região da UHE Lajeado foi elaborada estabelecendo-se que os dados de tais pontos seriam processados utilizando-se como referências as estações da RBMC mais próximas e que proporcionam melhor geometria à rede de processamento: MABA, TOGU, TOPL e IMPZ. As coordenadas dessas estações, bem como as velocidades empregadas nesse processamento foram obtidas à partir das soluções multianuais do projeto SIRGAS. Adotou-se o método QIF (*Quasi-Ionospheric Free*) de solução das ambiguidades (DACH et al, 2007), tendo em vista que as linhas de base

formadas com essas estações de referência são longas (até 492,4 km), conforme ilustra a Figura 14. Logo, há necessidade de considerar os efeitos ionosféricos e troposféricos nos sinais GNSS.





O que difere essa estratégia do que se adota convencionalmente é sobretudo o controle de qualidade nos subprogramas MAUPRP e RESRMS do BERNESE 5.0, onde foram consideradas tolerâncias mais rigorosas com relação à quantidade mínima de perdas de ciclo aceitas para que observação não seja removida, bem como no que se refere à remoção de observações com resíduos considerados significativos para a aplicação em questão.

De modo geral, os marcos à serem levantados (Figura 13) foram coletados três vezes com períodos de ocupação de 8 horas em média. Esses levantamentos foram realizados durante os dias 282, 283 e 284 de 2013. Para obtenção das coordenadas finais para a campanha, foram combinadas as soluções das três passagens ou coletas sobre cada um dos marcos.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo são apresentados os experimentos e análises realizados nessa pesquisa no contexto da estimativa dos gradientes horizontais troposféricos, bem como seu impacto no posicionamento GNSS.

4.1 Avaliação do comportamento do gradiente horizontal troposférico

No intuito de verificar a ordem de grandeza do parâmetro estimado como gradiente horizontal foram calculadas as médias de suas componentes GE e GN para os dois períodos considerados, seco e úmido. A partir das quantidades médias para as componentes E e N foi determinado o vetor resultante do gradiente horizontal. A Figura 15 mostra a representação dos valores resultantes médios para todas as estações das redes nos processamentos realizados.

Pode-se verificar que no período úmido os valores dos gradientes horizontais tendem à ser mais significativos. Além disso, os gradientes estimados nas estações mais ao sul do Brasil foram relativamente maiores. Isso poderia ser explicado pelo fato de o gradiente horizontal também estar associado às variações de relevo nas proximidades das estações GNSS, conforme verificado por Morel et al. (2014). Isso ocorre, provavelmente, devido ao suave aumento na concentração da pressão parcial de vapor d'água próximo aos paredões montanhosos. No caso do Brasil essas variações de relevo são mais presentes nas regiões sul e sudeste, e também próximo ao litoral.

Figura 15 – Exemplos de valores do vetor resultante das componente GE e GN do gradiente horizontal troposférico.





No Apêndice A, são apresentadas as cartas produzidas para os valores diários dos gradientes horizontais em todos os dias do experimento. Também, pode-se observar que os gradientes horizontais não mantiveram um padrão absoluto nos diferentes dias do experimento, o que evidencia o grau de variabilidade desse parâmetro.

4.2 Análise do impacto do gradiente horizontal no posicionamento por região

Para avaliar os impactos oriundos da estimativa dos gradientes horizontais em termos de determinação da posição das estações, foi analisada a repetibilidade das coordenadas estimadas em combinações semanais (duas semanas para cada estação: seca e chuvosa) das equações normais de soluções diárias no subprograma ADDNEQ do BERNESE 5.2. Os resultados do posicionamento com e sem a estimativa do gradiente horizontal troposférico para cada uma das redes locais (RNORD, RNORT, RCENT, RSUL e RSUD) foram analisados separadamente.

4.2.1 Resultados para a região sul

A Figura 16 mostra a comparação para as duas semanas do período úmido no posicionamento em rede para a região sul. Analisa-se a repetibilidade das coordenadas estimadas para cada uma das estações envolvidas com e sem a inserção dos gradientes horizontais troposféricos como parâmetros. Nesse sentido, a Figura 17 traz a mesma comparação para o período seco.

Figura 16 – Repetibilidade na estimativa das coordenadas em E, N e Up do SGL (Sistema Geodésico Local) para o período úmido com e sem estimativa do gradiente horizontal troposférico na região sul.



Figura 17 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas em E, N e Up do SGL para o período seco com e sem a estimativa do gradiente horizontal troposférico na região sul. (a) Semana 1 (b) Semana 2



Observa-se que a repetibilidade em ambos os períodos seco e úmido na região sul apresentou melhora, embora pequena, em todas as componentes. Além disso, como esperado as coordenadas injuncionadas apresentaram menor variação em sua repetibilidade. As melhorias médias para os dois períodos seco e úmido são quantificadas na Tabela 4.

	F	Repetibili	Ganhos	com esti	mação				
RSUL	Sem gradientes		Com gradientes			de gradientes horiz, (%)			
	E[mm]	N[mm]	U[mm]	E[mm]	N[mm]	U[mm]	Е	Ν	U
Estação úmida	1,86	1,74	6,20	1,11	1,56	4,93	40,59	10,09	20,42
Estação seca	1,07	0,95	3,05	0,56	0,98	2,58	47,89	-3,16	15,27

Tabela 4 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região sul.

Com base na Tabela 4, depreende-se que houve melhoras em todas as componentes no período úmido, as quais foram de 40,59% (0,75mm), 10,09% (0,18mm) e 20,42% (1,27mm) para as componentes E, N e Up, respectivamente. Por outro lado, no período seco observa-se melhorias de 47,89% (0,51mm) e 15,27% (0,47mm) nas componentes E e U, e degradação na componente N de 3,16% (-0,03mm).

4.2.2 Resultados para a região sudeste

A Figura 18 mostra a comparação para as duas semanas durante o período úmido. Assim como realizado anteriormente para a região sul, analisa-se a repetibilidade das coordenadas estimadas para cada uma das estações envolvidas com e sem a inserção dos gradientes horizontais troposféricos como parâmetros. A

Figura 19 ilustra a mesma comparação para o período seco.

Figura 18 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período úmido com e sem estimativa do gradiente horizontal troposférico. (a) Semana 1



(b) Semana 2





Com exceção das componentes E e U, na semana 1 do período úmido, bem como da componente E na semana 1 do período seco, verifica-se que a repetibilidade em ambos os períodos seco e úmido na região apresentou alguma melhora na média da repetibilidade das coordenadas das estações, quando se realiza a estimativa do gradiente horizontal troposférico.

Porém, houve piora na repetibilidade da componente Up nos casos das estações PPTE et CHPI na primeira semana do período úmido e o mesmo ocorre também para a estação OURI na segunda semana desse mesmo período. As melhorias médias para os dois períodos seco e úmido são quantificadas na Tabela 5.

	F	Repetibili	dade das	Ganhos	com estir	nação			
RSUD	Sem gradientes			Com gradientes			de gradientes horiz, (%)		
	E[mm]	N[mm]	U[mm]	E[mm]	N[mm]	U[mm]	Е	Ν	U
Estação úmida	1,44	1,57	6,00	1,36	1,14	6,60	5,57	27,16	-9,92
Estação seca	0,89	0,80	3,58	0,75	0,67	3,39	15,82	16,88	5,45

Tabela 5 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região sudeste.

Com base na Tabela 5, depreende-se que houve melhoras globais em ambos os períodos, com exceção da componente vertical do período úmido onde verifica-se degradação de 9,92% quando o gradiente horizontal troposférico é estimado. Assim como verificado na região sul as melhorias em planimetria foram mais expressivas em termos relativos.

4.2.3 Resultados para a região centro-oeste

A Figura 20 mostra a comparação para as duas semanas do período úmido. Como anteriormente, analisa-se a repetibilidade das coordenadas estimadas para cada uma das estações nos dias das duas semanas do experimento com e sem a inserção dos gradientes horizontais troposféricos como parâmetros. A

Figura 21 traz a mesma comparação para o período seco.

Figura 20 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas em E, N e Up do SGL para o período úmido com e sem a estimativa do gradiente horizontal troposférico na região centro-oeste.



Figura 21 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem estimativa do gradiente horizontal troposférico na região centro-oeste (a) Semana 1 (b) Semana 2



Na primeira semana do período úmido houve degradação da componente Up na estação MTSF e o mesmo ocorre em todas as estações na segunda semana desse período. Porém, com exceção dessa segunda semana do período úmido, observa-se que a repetibilidade em ambos os períodos seco e úmido na região centro-oeste apresentou suave melhora em todas as componentes para a maioria das estações. As melhorias médias para os dois períodos seco e úmido são quantificadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas em E, N e Up do SGL com emprego do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região centro-oeste

	F	Repetibili	Ganhos	s com est	imação				
RCENT	Sem gradientes		Com gradientes		de gradientes horiz, (%)				
	E[mm]	N[mm]	U[mm]	E[mm]	N[mm]	U[mm]	Е	Ν	U
Estação úmida	1,57	1,08	4,83	1,39	1,15	5,65	11,46	-6,51	-17,10
Estação seca	1,01	1,42	3,23	0,67	1,15	1,62	33,83	19,37	49,77

Observa-se que houveram melhorias mais expressivas no período seco para essa região (Tabela 6), as quais foram de 33,83%, 19,37% e 49,77% para as componentes E, N e U, respectivamente. Por outro lado, no período úmido observa-se melhorias de 11,46% para as componentes E, e degradação nas componente N e U, de 6,51% e 17,10%.

4.2.4 Resultados para a região nordeste

A Figura 22 mostra a comparação da repetibilidade das coordenadas para as duas semanas do período úmido na região nordeste e a Figura 23 traz a mesma comparação para o período seco.





Figura 23 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem estimativa do gradiente horizontal troposférico na região nordeste (a) Semana 1 (b) Semana 2



Com exceção da estação PEPE na segunda semana do período úmido, observa-se que a repetibilidade nos dois períodos na região nordeste apresenta melhora nas componentes planimétricas, quando se adota a estimativa do gradiente horizontal troposférico. Além disso, com exceção da estação PEPE na semana 1 do período seco, e das estações BAIR e BOMJ na semana 2 do período úmido, também verifica-se melhora na repetibilidade da componente vertical para todas as demais estações. As melhorias médias para os dois períodos seco e úmido são quantificadas na Tabela 7.

	F	Repetibili	Ganhos	com esti	mação				
RNORD	Sem gradientes		Com gradientes			de gradientes horiz, (%)			
	E[mm]	N[mm]	U[mm]	E[mm]	N[mm]	U[mm]	Е	Ν	U
Estação úmida	1,26	1,65	6,00	1,08	1,04	4,65	14,68	37,27	22,52
Estação seca	1,02	1,11	3,23	0,89	0,51	3,52	12,75	54,05	-8,82

Tabela 7 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região nordeste

Com base na Tabela 7, pode-se verificar que houveram melhorias em todas as componentes no período úmido, sendo de 40,59%, 10,09% e 20,42% para as componentes E, N e U, respectivamente. Por outro lado, no período seco observa-se melhorias de 47,89% e 15,27% nas componentes E e U, e degradação na componente N de de 3,16%.

4.2.5 Resultados para a região norte

A última região de estudo, foi a região norte. De modo geral, essa região apresenta altos índices de umidade, logo espera-se um impacto maior dos parâmetros associados a este fator, tais como o gradiente horizontal. A Figura 24 mostra a comparação para as duas semanas do período úmido, assim como nos casos anteriores analisa-se a repetibilidade das coordenadas estimadas para cada uma das estações com e sem a inserção dos gradientes. Os resultados para o período seco podem ser verificados na Figura 25.

Figura 24 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período úmido com e sem estimativa do gradiente horizontal troposférico na região norte.



(a) Semana 1

(b) Semana 2

Figura 25 - Repetibilidade na estimativa das coordenadas para o período seco com e sem estimativa do gradiente horizontal troposférico na região norte.



Observa-se que a repetibilidade em ambos os períodos seco e úmido na região norte apresentou melhorias para a componente E em todos os casos. Por outro lado, a componente altimétrica apresentou degradações para três das quatro semanas em análise. Além disso, os valores de repetibilidade para a componente N foram anômalos, acima dos resultados verificados para as demais regiões, considera-se a possibilidade de que houveram problemas na definição do datum para essa componente. As melhorias médias para os dois períodos seco e úmido são quantificadas na Tabela 8.

	F	Repetibili	Ganhos	com esti	mação				
RNORT	Sei	n gradier	ntes	Com gradientes			de gradientes horiz, (%)		
	E[mm]	N[mm]	U[mm]	E[mm]	N[mm]	U[mm]	Е	Ν	U
Estação úmida	6,73	34,34	6,97	5,55	29,39	6,10	17,61	14,40	12,49
Estação seca	5,08	20,37	5,73	4,86	20,41	5,83	4,43	-0,22	-1,75

Tabela 8 – Avaliação das melhorias obtidas para repetibilidade das coordenadas com emprego do gradiente horizontal troposférico para a rede de processamento da região norte

Com base na Tabela 4, conclui-se que houveram melhorias globais significativas no período úmido nas médias da repetibilidade das coordenadas de todas estações, as quais foram de 17,61% (1,19 mm), 14,40% (4,95 mm) e 12,49% (0,87 mm) para as componentes E, N e U, respectivamente. Por outro lado, no período seco observa-se melhorias apenas na

componente E, que foi 4,43% (0,23 mm) e degradação de 0,22% (0,04mm) e 1,75% (-0,10), nas componente N e U.

4.2.6 Análise do impacto provocado pelos gradientes horizontais na repetibilidade das coordenadas de todas as regiões

Para realizar um balanço final sobre a adoção dos gradientes na região brasileira de modo geral, foram comparadas entre si as melhorias ou perdas obtidas para cada uma das componentes em todas as regiões. Nas Figuras 23 e 24 onde esta comparação é apresentada, verifica-se impactos positivos da estimativa dos gradientes horizontais em todas as regiões de modo geral.

Os valores médios para as melhorias alcançadas em todas as estações para as cinco campanhas, podem ser verificados nas Tabelas 8 e 9 confirmando o resultado visual da Figura 27. Pois em média o RMS para a repetibilidade das coordenadas no período úmido diminuiu 0,48mm, 1,22mm e 0,41mm (Tabela 8), o que representa melhorias de 17,98%, 16,48% e 5,68% (Tabela 9), no período úmido para as componentes E, N e U, respectivamente. No período seco, tais valores correspondem 0,27mm, 0,19mm e 0,38mm, caracterizando melhorias de 22,94%, 17,38% e 11,98%, nessa ordem.



Figura 26 – Melhorias obtidas com adoção dos gradientes horizontais em cada região de estudo

	Р	eríodo Úmic	lo	Período Seco			
	E(mm)	N(mm)	U(mm)	E(mm)	N(mm)	U(mm)	
RSUL	0,76	0,18	1,27	0,51	-0,03	0,47	
RSUD	0,08	0,43	-0,60	0,14	0,14	0,20	
RCENT	0,18	-0,07	-0,83	0,34	0,28	1,61	
RNORD	0,19	0,62	1,35	0,13	0,60	-0,29	
RNORT	1,19	4,95	0,87	0,23	-0,04	-0,10	
Média	0,48	1,22	0,41	0,27	0,19	0,38	

Tabela 9 – Comparativo entre os resultados de todas as regiões para os ganhos em milímetros nas melhorias alcançadas com e sem a adoção dos gradientes horizontais

Além da análise da redução absoluta no valor do erro, é sempre interessante quantificar as melhorias com relação ao erro total, o que permite compreender a real significância da melhoria para a solução global. Nesse sentido, a Figura 27 e Tabela 10 apresentam os valores relativos em porcentagem da variação dos erros nas coordenadas.

Figura 27 – Comparação do impacto dos gradientes horizontais na repetibilidade das coordenadas de todas as regiões de modo geral



	I	Período Úmi	do	Período Seco			
-	E(%)	N(%)	U(%)	E(%)	N(%)	U(%)	
RSUL	40,59	10,09	20,42	47,89	-3,16	15,27	
RSUD	5,57	27,16	-9,92	15,82	16,88	5,45	
RCENT	11,46	-6,51	-17,10	33,83	19,37	49,77	
RNORD	14,68	37,27	22,52	12,75	54,05	-8,82	
RNORT	17,61	14,40	12,49	4,43	-0,22	-1,75	
Média	17,98	16,48	5,68	22,94	17,38	11,98	

Tabela 10 – Percentual do erro total reduzido devido à adoção de gradientes horizontais troposféricos

4.2.7 Avaliação dos valores de qui-quadrado

Nessa seção são avaliados os valores do teste qui-quadrado ou teste estatístico global para cada uma das redes de ajustamento. Quando o fator de referência, também conhecido como variância de peso para unidade a posteriori (calculada), desse teste se aproxima do valor 1, tem-se indícios de que os erros envolvidos estão apropriadamente modelados. Logo, teoricamente, os gradientes horizontais devem tornar os valores do teste qui-quadrado mais próximos de um. No entanto, se o gradiente horizontal for um parâmetro desnecessário, sua inserção no processo de estimativa das coordenadas, diminui os graus de liberdade, e portanto, poderia aumentar o valor do teste qui-quadrado, reduzindo a confiabilidade² do ajustamento de observações.

A Figura 28 apresenta os resultados do fator de referência à serem empregados no quiquadrado para as soluções de rede de cada um dos dias de experimento na região sul.

² Confiabilidade: trata-se do menor erro detectável em uma observação, com certo nível de probabilidade, bem como a sua influência nos resultados do ajustamento, quando não detectado (TEUNISSEN, 2006).

Figura 28 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RSUL durante todos os dias do experimento



Para a região sul houve uma redução de 0,1 no fator de referência do teste quiquadrado (Figura 28), que ainda assim não atingiu um valor ideal para o ajustamento, ou seja não passaria no teste de hipóteses. Haja vista, que com ou sem gradientes os valores médios do teste foram superiores a 1. Para a região sudeste (Figura 29), a melhoria foi aproximadamente dessa mesma magnitude (0,1), porém os resultados dos valores médios do teste também deixaram aquém, sendo de 2,92 sem e 2,83 com a estimativa do gradiente horizontal troposférico. Esses valores são ainda superiores aos apresentados pela região sul, onde verifica-se valores médios de 2,4 e 2,3, sem e com os gradientes, respectivamente.

Figura 29 – Análise do teste Qui-quadrado para a rede RSUD durante todos os dias do experimento.



Com relação aos valores do teste qui-quadrado para a região centro-oeste (Figura 30) verificou-se também uma pequena redução (0,05), evidenciando novamente impacto positivo da estimativa do gradiente horizontal troposférico. É interessante observar que os valores do fator de referência do teste qui-quadrado nessa região foram os que mais se aproximaram do valor esperado próximo de 1.

Figura 30 - Análise do teste Qui-quadrado para a rede RCENT durante todos os dias do experimento



Na região nordeste, tem-se que o fator de referência médio do teste qui-quadrado foi reduzido de 3,00 para 2,93 quando considera-se a assimetria azimutal. Entretanto, os valores do teste em si mantiveram-se elevados. Constata-se que entre os casos analisados até então, os valores do teste para os dias do período seco da rede RCENT, foram de modo geral os mais apropriados.

Figura 31 – Análise do teste Qui-quadrado para a rede RNORD durante todos os dias do experimento.



Finalmente, na região norte (Figura 30), pode-se observar efeito contrário ao das demais regiões com relação aos valores de referência do teste qui-quadrado para os períodos úmido e seco, haja vista que no período úmido os valores do teste foram inferiores aos dos dias do experimento no período seco. No entanto, os resultados da campanha de processamento dessa região foram problemáticos e devem ser considerados com cautela.

Figura 32 – Análise do teste Qui-quadrado para a rede RNORT durante todos os dias do experimento.



De modo geral para todas as campanhas, sobretudo no período úmido, verificou-se reduções nos valores do fator do teste qui-quadrado, tornando o mesmo mais próximo do valor ideal que seria 1 (um), quando o gradiente horizontal foi estimado, o que indica que os erros foram modelados de melhor maneira quando esse parâmetro foi considerado. Porém, é

importante frisar que os valores encontrados ainda encontram-se muito distantes do ideal, o que indica deficiências no modelo.

4.3 Análise da influência dos gradientes horizontais no posicionamento GNSS para fins de monitoramento de estruturas.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para aplicação prática descrita na seção 3.3.2. No intuito de quantificar o impacto do uso dos gradientes, são apresentados a seguir os valores das discrepâncias em relação as coordenadas finais em cada passagem, bem como os correspondentes valores de EMQ ponderados *(output* do módulo COMPAR). A Tabela 11 mostra os valores sem a estimativa dos gradientes horizontais, a tabela 12 traz o resultado equivalente quando realiza-se a estimativa dos gradientes horizontais e a Figura 33 apresenta a comparação entre as duas soluções.

Nessas tabelas os campos preenchidos com "-" indicam soluções removidas da combinação, pois a discrepância verificada com relação à coordenada final ultrapassou o limiar de 10 mm considerado como acurácia requerida para aplicação. Logo nesses casos, desconsiderou-se à observação (coordenada estimada na passagem em questão) e realizou-se nova combinação. Com base nesse critério, foi necessário descartar uma solução de cada uma das seguintes estações: PI02 (Pilar 2), RNP01 e RNP02.
Estação	Componente	EMQ (mm)	Discrepâncias em relação à coordenada final (mm)			
			Sol 1.	Sol 2.	Sol. 3	
IMPZ	Ν	1,35	-1,82	0,50	0,33	
	Е	1,77	0,18	2,33	-0,88	
	U	5,81	-6,57	4,30	2,42	
MABA	N	3,53	4,70	-1,49	0,82	
	Е	0,73	0,55	0,38	0,79	
	U	2,98	0,47	-3,69	-1,99	
PI01	Ν	5,30	-4,51	2,87	5,26	
	Е	4,99	1,70	-3,65	5,79	
	U	6,97	-0,65	-7,98	5,76	
P102	N	3,10	-	1,06	-2,91	
	Е	2,96	-	-2,72	-1,17	
	U	17,31	-	-8,26	15,22	
P103	N	3,27	-1,32	0,98	-4,33	
	Е	2,19	1,26	-1,86	-2,13	
	U	8,24	-7,67	4,55	7,49	
RNP1	N	3,76	-3,12	2,10	-	
	Е	2,76	1,40	-2,38	-	
	U	7,30	-0,95	-7,24	-	
RNP2	N	3,11	-2,63	1,67	-	
	Е	2,81	1,39	-2,44	-	
	U	5,75	-4,06	-4,08	-	
TOGU	N	1,98	1,19	-1,14	2,27	
	Е	1,85	-0,76	0,38	2,47	
	U	6,98	8,39	-3,28	-4,03	
TOPL	N	3,81	-3,67	2,30	-3,21	
	Е	2,69	0,10	-3,00	-2,33	
	U	3,72	-0,07	3,25	4,14	

Tabela 11 - Resíduos e EMQ em relação a solução final sem o uso de gradientes horizontais

Estação	Componente	EMQ (mm)	Discrepâncias em relação à coordenada final (mm)			
			Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	
IMPZ	N	0,83	0,23	0,95	-0,65	
	Е	1,42	0,88	1,77	0,36	
	U	4,93	-6,52	2,49	0,02	
MABA	N	2,90	3,68	-0,60	1,70	
	Е	1,13	-0,61	0,98	1,10	
	U	4,7	-0,74	-5,47	-3,70	
PI01	Ν	2,75	-2,95	1,94	1,62	
	Е	4,88	-3,01	0,50	6,19	
	U	3,18	-1,18	-4,13	1,36	
PI02	N	2,52	-	0,84	-2,37	
	Е	1,96	-	0,95	-1,72	
	U	6,45	-	-0,98	6,37	
PI03	Ν	1,96	-0,40	-0,47	-2,71	
	Е	1,58	-1,77	-1,32	-0,39	
	U	9,31	-8,65	9,33	3,40	
RNP1	Ν	2,77	-2,35	1,47	-	
	Е	2,11	-2,04	0,55	-	
	U	2,94	-1,55	-2,49	-	
RNP2	Ν	2,27	-1,90	1,25	-	
	Е	2,57	-2,39	0,95	-	
	U	5,64	-5,54	1,05	-	
TOGU	N	0,86	-0,75	-0,78	0,55	
	Е	1,85	0,96	0,61	2,37	
	U	4,55	6,18	0,18	-1,79	
TOPL	Ν	2,27	-2,83	0,57	-1,41	
	Е	3,71	-1,19	-3,37	-3,84	
	U	5,84	4,08	3,60	6,20	

Tabela 12 - Resíduos e RMS em relação a solução final com o uso de gradientes horizontais

Com base nos valores apresentados pelas Tabela 11 e Tabela 12, verifica-se que quando não foram empregados gradientes horizontais os resíduos nas componentes E, N e U obtiveram média de -0,19mm, -0,38mm, e -0,18 mm respectivamente, com desvio-padrão de 2,15mm, 2,19, e 6,00 mm. Por outro lado, quando são estimados os gradientes horizontais do

atraso troposférico tem-se médias de -0,14mm, -0,22mm, e 0,06mm para as componentes E, N e U, com respectivo desvio padrão de 2,16mm, 1,75mm, e 4,55mm. Isto representa melhorias de 26%(E), 42%(N) e 66%(U) na qualidade da média dos resíduos que se tornaram mais próximas de zero, evidenciando a presença de menos efeitos sistemáticos. Para o desviopadrão dos resíduos também foram verificadas melhorias expressivas para duas componentes: N (20%) e U (24%). Somente a componente E apresentou suave degradação (0,4%).

Figura 33 – EMQ das discrepâncias entre as coordenadas de cada passagem com relação à solução final.



Vale ressaltar que a adoção dos gradientes horizontais prejudicou ligeiramente a estimativa da componente altimétrica para as estações MABA, PI03 e TOPL. No entanto, de maneira global pode-se dizer que com adoção dos gradientes alcança-se melhor acurácia, haja vista que foram reduzidos consideravelmente os efeitos de tendências (médias residuais mais próximas de zero) e houve melhor repetibilidade nas coordenadas encontradas (precisão).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal do trabalho que consiste no estudo da influência dos gradientes horizontais troposféricos sobre o posicionamento GNSS de alta acurácia foi alcançado por meio de estudos que permitiram verificar e quantificar as melhorias proporcionadas pela introdução dos gradientes horizontais troposféricos no processamento de dados GNSS. Para tanto, empregou-se o software o científico BERNESE nas versões 5.0 e 5.2, o qual representa o estado da arte em termos de processamento e análise de observações GNSS.

Foi apresentada breve bibliográfica sobre os principais aspectos relacionados ao GNSS e aos métodos de posicionamento existentes que permitem aos usuários obter posição com alta acurácia. Também foi apresentada uma descrição dos SCA disponíveis em território brasileiro.

Na seção 2.4 foi apresentado de maneira sucinta e objetiva o conhecimento que se tem sobre os efeitos da troposfera na propagação de sinais GNSS, de modo que elencou-se os modelos e funções de mapeamento para estimativa/cálculo ou predição do atraso zenital troposférico. Na seção 2.4.5 é discutida a consideração ou não dos efeitos da assimetria azimutal troposférica, o que implica no uso de gradientes horizontais no processamento de dados GNSS.

Foram conduzidos experimentos nas regiões norte, sul, sudeste, centro-oeste e nordeste, as quais possuem características topográficas e climáticas relativamente diferentes. Selecionou-se cinco estações por região, e as estratégias de processamento testadas para cada uma das redes foi exatamente à mesma, de modo que as comparações possam ser válidas.

Como os gradientes horizontais estão mais associados à umidade, procurou-se avaliar dois períodos por região: seco e úmido. Tais testes apresentaram valores médios para as melhorias em praticamente todas as estações GNSS nas regiões dos experimentos. De modo que, em média, o RMS para a repetibilidade das coordenadas no período úmido diminuiu algo em torno de 0,48mm, 1,22mm e 0,41mm, o que representa melhorias de 17,98%, 16,48% e 5,68%, nesse período para as componentes E, N e U, respectivamente. No período seco, tais valores correspondem 0,27mm, 0,19mm e 0,38mm, caracterizando melhorias de 22,94%, 17,38% e 11,98%. Além disso, foram avaliados os valores do teste qui-quadrado ou teste estatístico global para cada uma das redes de ajustamento. Quando o fator de referência desse teste se aproxima do valor 1, tem-se indícios de que os erros estão apropriadamente modelados. Em todos os casos verificou-se pequenas melhorias no fator de referência do teste, o qual foi mais próximo de 1, quando o gradiente horizontal troposférico fora estimado na

solução do ajustamento de observações GNSS. As melhorias no teste qui-quadrado deverão ser estudadas com maior cuidado, pois embora os resultados do processamento com os gradientes tenham sido melhores, ainda assim podem ser considerados elevados.

No segundo experimento, foram realizadas as estimativas de coordenadas com e sem os gradientes horizontais no processamento de dados GNSS para fins de monitoramento estrutural da UHE Lajeado. Esse estudo caracterizou uma aplicação prática, na qual acurácia melhor que 10 milímetros é requerida. Verifícou-se que quando não foram empregados gradientes horizontais os resíduos nas componentes E, N e U obtiveram média de -0,19mm, - 0,38mm, e -0,18 mm respectivamente, com desvio-padrão de 2,15mm, 2,19, e 6,00 mm. Por outro lado, quando são estimados os gradientes horizontais do atraso troposférico tem-se médias de -0,14mm, -0,22mm, e 0,06mm para as componentes E, N e U, com respectivo desvio padrão de 2,16mm, 1,75mm, e 4,55mm. Tais resultados representam melhorias de 26%(E), 42%(N) e 66%(U) na qualidade da média dos resíduos os quais se tornaram mais próximas de zero, evidenciando a presença de menos efeitos sistemáticos. Para o desvio-padrão dos resíduos também foram verificadas melhorias expressivas para duas componentes: N (20%) e U (24%). Somente a componente E apresentou suave degradação (0,4%).

Dessa forma, com base nos estudos realizados, pode-se dizer que com adoção da estimativa de gradientes alcança-se melhor acurácia, haja vista que foram reduzidos os efeitos de tendências (médias residuais mais próximas de zero) e houve melhor repetibilidade nas coordenadas estimadas (precisão).

Para os trabalhos futuros, recomenda-se a realização de longas séries temporais do gradiente horizontal troposférico para avaliações do comportamento do parâmetro ao longo dos ciclos sazonais no Brasil. Em termos de posicionamento, uma recomendação para novos estudos é correlacionar as melhorias obtidas com o gradiente horizontal e as variações de relevo nos entornos da estação, tendo em vista a variabilidade do parâmetro em regiões acidentadas como verificado em Morel et al, (2014). Uma outra questão importante acerca do gradiente a ser avaliada, trata-se da influência da geometria dos satélites nos parâmetros relacionados à troposfera, dentre eles o gradiente horizontal.

REFERÊNCIAS

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

ALVES, D. B. M.; ABREU, P. A. G., SOUZA, J. S., GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Revista Brasileira de Geomática,** v. 1, n. 1, 8-13, 2013.

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

ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data. In: ION GPS 2003, Oregon Convertion Center, Portland. **Proceedings**..., 2003.

BEVIS, M. G.; SUSINGER, S., HERRING, T., ROCKEN, C., ANTHES, R. A., WARE, R. H. GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, vol. 97, No.D14, p. 15.787-15.801, 20 de Outubro, 1992.

BEVIS, M.; BUSINGER CHISWELL, S.; HERRING, T. A.; ANTHES, R. A.;ROCKEN, C.; WARE, R. H. GPS Metheorology: Mapping Zenith Wet Delays Onto Precipitable Water. **Journal of Applied Meteorology**. v.33, p.379-386,1994.

BLEWITT, G. GPS data processing methodology. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. GPS for Geodesy. 2. ed. New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998, p. 231-270.

BOEHM, J.; SCHUH. H. Vienna mapping functions in VLBI analyses. Geophys. Res. Lett., 31, L01603, doi: 10.1029/2003GL018984. 2004.

BOEHM, J.; NIELL A. E.; SCHUH. H.; TESMER V.; TREGONING, P. Mapping functions for atmospheric delay modelling in GNSS analysis, J. **Geophys**. Res., **111**, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629, 2006.

CHEN, G., and T.A. HERRING (1997) "Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data" Journal of Geophysical Research. Vol. 102, No. B9, pp. 20489-20502.

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

DACH, R.; HUGENTOBLER, U.; WALSER, P. **BERNESE GPS SOFTWARE 5.0**: Tutorial Processing Example - Introductory Course, Terminal Session, Setembro de 2011.

DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO I., ROGERS, A. E., ELGENED, G. Geodesy By Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. Radio Sci., vol. 20, 1593-1607, 1985.

DAVIS, J. L., ELGENED, G., NIELL, A. E., And KUEHN, C. E. Ground-Based measurement of gradients in the 'wet' radio refractivity of air. Radio Sci. 28,1003-1018, 1993

EMARDSON, T. RAGNE, **Studies of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System**. School of Electrical and Computer Engineering Charmers University of Technology, Göteborg, Sweden. Technical Report No. 339, 1998

FUND, F., Observations GPS et retards tropophériques : modélisations et application aux effets de surcharge océanique dans l'Ouest de la France. Thèse de Doctorat (2009). Université de Nantes.

GHODDOUSI-FARD, R. Modelling Tropospheric Gradients and Parameters from NWP Models: Effects on GPS Estimates. Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 264, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 216 pp. Fev. 2009.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J., GNSS – GPS: Theory and Practice. 3.ed. New York: Springer-Verlag, 1994.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

HERRING, T. A; KING, R. W; MCCLUSKY, S. C; **GAMIT Reference Manual - GPS Analysis at MIT**. Release 10.4. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 171 p. 2010

HERRING, T. A.; R. W. KING, S. C. MCCLUSKY, **Introduction to GAMIT/GLOBK**, Departement of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachussetts Institute of Technology. Disponível em: http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/Intro_GG_10.3.pdf>. Acesso em 24 de setembro de 2009.

INGLE, V. K. Digital Signal Processing using MATLAB. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000.418 p.

LAVAUX, A.-L., Mise en place d'une chaîne de traitement GPS à l'aide du logiciel GAMIT et application à la modélisation des délais troposphériques. Mémoire de travail de fin d'études. École Supérieure des Topographes et Geomètres, Le Mans, 2011.

LANYI, G., **Tropospheric Delay Affecting in Radio Interferometry**. Telecommunications and Data Acquisition Progress Rep. Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, CA, April-June, 1984.

LI, X.; ZUS, F.; LU, C.; NING, T.; DICK, G.; GE, M.; JENS, W.; SCHUH, H.; Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multi-constellation GNSS observations. American Geophysical Union. 2015.

MARINI, J. W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. Radio Sci. v. 7, p. 223-231, 1972. MARQUES, H. A. PPP em tempo real com estimative das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS. – Presidente Prudente : [s.n], 2012 xxxvi, 244 f. : il.

MEINDL, M., SCHAER, S., HUGENTOBLER, U., e BEUTLER, G. 2004. Tropospheric Gradient Estimation at CODE: Results from Global Solutions, in Applications of GPS Remote Sensing to Meteorology and Related Fields. In Journal of the Meteorological Society of Japan, 82(1B):331 – 338.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 2.ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

MONICO J. F. G.; ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; CAMARGO, P. O.; L. F. SAPUCCI; FORTES, L. P. S., "Atmospheric Models Applied to DGPS and RTK Network in Brazil: Preliminary Results," *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*, Fort Worth, TX, September 2006, pp. 1151-1158.

MONICO, J. F. G. ; de FRANCHESSI, G ; BOUGARD B ; AQUINO, M. ; SOLEY M. . CIGALA: A **FP7 innovative activity to tackle the threat of ionospheric scintillation to GNSS operations in Latin America**. RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online), v. 64, p. 767-779, 2012.

MOREL, L. ; POTTIAUX, E. ; DURAND, F. ; FUND, F. ; BONIFACE, K. ; OLIVEIRA JUNIOR, P. S. ; BAELEN, J. V. Validity and behavior of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica. Advances in Space Research xxx (2014) xxx-xxx

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

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

OLIVEIRA JUNIOR, P. S. ; ALVES, D B M ; MONICO, J F G . A Regional Ionospheric Modeling in Network-Based Positioning: Investigation and Implementation in the context of GNSS SP-BRA/Network. In: AGU 2010- The Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings do AGU 2010** - The Meeting of the Americas, 2010

OLIVEIRA JUNIOR, P. S. ; MOREL, L ; MONICO, J F G ; SAPUCCI, L. F. ; DURAND, F. Análise da Estimativa do Gradiente Horizontal da Troposfera com Relação ao Ambiente Geografico: estudo de caso para Coserga e região de Paris. In: VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2013, Curitiba, Brazil. Anais do VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2013.

OMAR, S.; RIZOS, C. Design of Reliable Communication System for Continuous GPS Reference Station Networks. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. **Proceedings...**, 2003.

ROSA, G.P.S.,2008. Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais. Dissertação de Mestrado, UNESP, Presidente Prudente-SP,Brasil, 106p.

SAASTAMOINEN, J. (1972), Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. the use of artificial satellites for geodesy, Geophys. Monogr., 15 (3), 247–251.

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

SAPUCCI, L. F. **Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade**. 2005. 167f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. Aplicações dos valores do IWV provenientes das redes de receptores GPS para suporte à previsão numérica de tempo no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 49-55, 2008.

SEEBER, G. Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications (2003), 2ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter.

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

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

TEUNISSEN, P. Testing theory: an introduction. 2. ed. Delft: Ed. VSSD, 2006. 147p

APÊNDICE A - CARTAS DO GRADIENTE HORIZONTAL PARA CADA DIA

Esse apêndice traz as cartas produzidas com o software GMT, as quais visam representar o comportamento do gradiente horizontal troposférico por meio dos vetores resultantes do gradiente horizontal estimados para cada sessão nos dias do experimento 1 para o período úmido (Figura 34) e para o período seco (Figura 35).







Figura 34 - Cartas do gradiente Horizontal para cada um dos dias do período úmido





