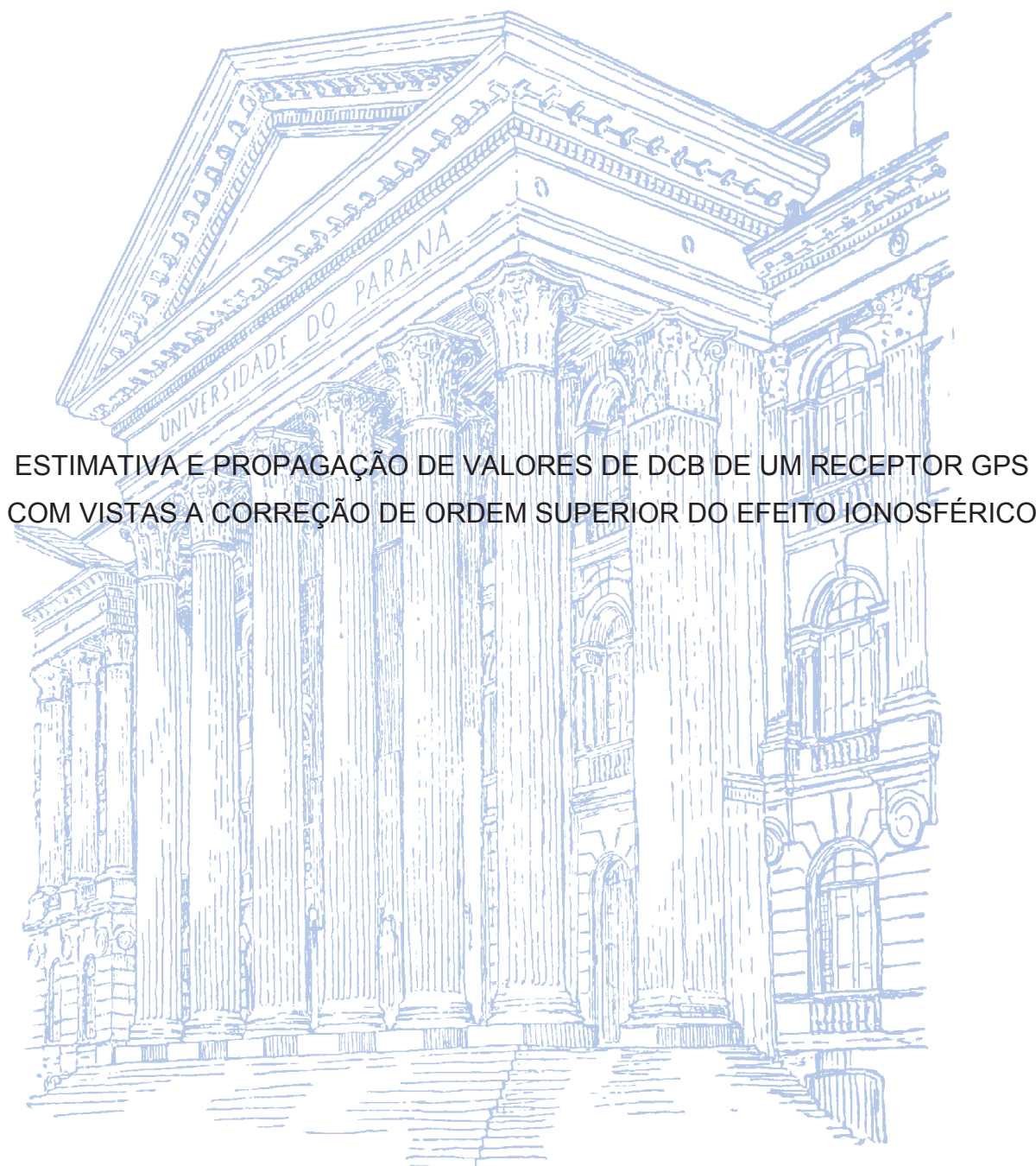


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIANE PIOVESAN DE MORAES CORDEIRO



ESTIMATIVA E PROPAGAÇÃO DE VALORES DE DCB DE UM RECEPTOR GPS  
COM VISTAS A CORREÇÃO DE ORDEM SUPERIOR DO EFEITO IONOSFÉRICO

CURITIBA

2019

FABIANE PIOVESAN DE MORAES CORDEIRO

ESTIMATIVA E PROPAGAÇÃO DE VALORES DE DCB DE UM RECEPTOR GPS  
COM VISTAS A CORREÇÃO DE ORDEM SUPERIOR DO EFEITO IONOSFÉRICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Lima Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno  
Ferreira

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

C794e Cordeiro, Fabiane Piovesan de Moraes

Estimativa e propagação de valores de DCB de um receptor GPS com vistas a correção de ordem superior do efeito ionosférico [recurso eletrônico] / Fabiane Piovesan de Moraes Cordeiro, 2019.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná  
Orientador: Prof. Dr. Tiago Lima Rodrigues  
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira

I. Satélites artificiais em navegação. 2. Sistema de Posicionamento Global. 3. Geodésia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Rodrigues, Tiago Lima. III. Ferreira, Luiz Danilo Damasceno. IV. Título.

CDD 526.640285

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **FABIANE PIOVESAN DE MORAES CORDEIRO** intitulada: **ESTIMATIVA E PROPAGAÇÃO DE VALORES DE DCB DE UM RECEPTOR GPS COM VISTAS A CORREÇÃO DE ORDEM SUPERIOR DO EFEITO IONOSFÉRICO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 19 de Fevereiro de 2019.


  
TIAGO LIMA RODRIGUES

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

Avaliador Externo (UNESP/PP)

  
CLAUDIA PÉREIRA KRUEGER

Avaliador Interno (UFPR)

*Dedico esta pesquisa primeiramente a Deus, pela graça de ter me permitido concluí-la e por não ter me desamparado quando mais precisei.*

*Ao meu marido Diogo, por segurar minha mão nos momentos mais difíceis e não ter desistido de mim, nem mesmo quando eu quis desistir. Para ele dedico, além deste trabalho, todo meu amor.*

*Aos meus pais, Eleandro e Leonice, pelo amor incondicional a mim concedido, pelo esforço e dedicação na realização de mais este sonho e durante todos estes anos de vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao fim de mais uma etapa em minha vida, não poderia deixar de agradecer a todos que estiveram presentes me apoiando durante esse tempo, em especial:

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento.

Aos meus orientadores, Prof. Luiz Danilo Damasceno Ferreira e Prof. Tiago Lima Rodrigues, pela orientação, ensinamentos, paciência e incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas e professores do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, pela companhia e contribuições, em especial ao Jorge Felipe Euriques por toda ajuda dedicada na construção desta pesquisa.

Aos meus amigos mais chegados que irmãos que a UFPR me presenteou: Ana Luiza Delazari, Caroline Militz, Dyeison Mlenek, Jair Tayra, Luis Fernando Silva e Renata Scarsi, pelas horas de conversa e diversão.

Aos colegas do Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS) da Universidade Federal do Paraná: Lívia, Tulio e Samoel.

Aos laboratórios: LAGEH (Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia), LAIG (Laboratório de Instrumentação Geodésica) e LABTOPO (Laboratório de Topografia) pelo empréstimo dos equipamentos.

Aos meus familiares, por toda compreensão na ausência dos encontros em família.

Aos meus pais, pelos ensinamentos ao longo dos anos e por todo apoio, essenciais para o cumprimento dessa etapa.

Por fim, não menos importante, mas com muito amor, ao meu esposo, que esteve ao meu lado ao longo desta caminhada, me dando todo suporte emocional necessário para conclusão deste projeto, a minha maior gratidão e todo meu carinho.

## RESUMO

Atualmente, o efeito provocado pela ionosfera nos sinais GNSS é um fator limitante a acurácia do posicionamento. Quando se almeja maior acurácia no posicionamento GNSS, é imprescindível a correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica que geralmente são negligenciados no processamento dos dados. O erro associado à ionosfera é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) presentes na atmosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. O cálculo do TEC é influenciado pelo erro sistemático conhecido como tendência inter-frequência (IFB) que, no caso do código, é a tendência diferencial devido ao atraso do código (DCB). Este erro é causado por atrasos no caminho do sinal GNSS ao percorrer o hardware do satélite e do receptor. Esta pesquisa tem como principal objetivo a determinação do DCB de um receptor GPS para utilização no cálculo do TEC e na correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica. Também foi feita a propagação numérica dos valores de DCB obtidos a fim de validar o experimento para otimização do tempo em trabalhos futuros. Realizou-se processamentos PPP no software RTKLIB para análise da acurácia planialtimétrica obtidas com a correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica. Os resultados obtidos no teste de propagação numérica do DCB mostraram uma acurácia média de 0,2 cm para latitude, 1,4 cm para longitude e 1,5 cm para altitude. Ainda, os resultados obtidos com os processamentos feitos com correção de ordem superior da refração ionosférica mostram uma melhora na ordem do milímetro para as componentes X e Z e na ordem do centímetro para a componente Y quando comparados com o processamento considerando apenas correção de primeira ordem.

Palavras chave: DCB; TEC; GNSS; efeitos ionosféricos de ordem superior; posicionamento GPS.

## ABSTRACT

Nowadays, the effect caused by the ionosphere on the GNSS signals is a factor limiting the accuracy of the positioning. When higher accuracy is sought in the GNSS positioning, it is essential to correct the higher order effects of ionospheric refraction that are generally neglected in data processing. The error associated with the ionosphere is directly proportional to the total electron content (TEC) present in the atmosphere and inversely proportional to the square of the frequency. The calculation of the TEC is influenced by the systematic error known as the inter-frequency bias (IFB), which in the case of the code is the differential code bias (DCB). This error is caused by delays in the GNSS signal path when traversing satellite and receiver hardware. This research has as main objective the determination of the DCB of a GPS receiver for use in the calculation of the TEC and in the correction of the higher order effects of the ionospheric refraction. It was also done the numerical propagation of the DCB values obtained in order to validate the experiment to optimize the time in future works. PPP processing was performed in the RTKLIB software to analyze the planialtimetric accuracy obtained with the correction of the higher order effects of the ionospheric refraction. The results obtained in the numerical propagation test of the DCB showed an average accuracy of 0.2 cm for latitude, 1.4 cm for longitude and 1.5 cm for altitude. Furthermore, the results obtained with the higher-order correction processes of the ionospheric refraction show an improvement in the millimeter order for the X and Z components and in the order of the centimeter for the Y component when compared to the processing considering only first order correction.

Keywords: DCB; TEC; GNSS; higher order ionospheric effects; GPS positioning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisões da atmosfera terrestre.....	21
Figura 2 – Reflexão e refração de uma onda eletromagnética.....	24
Figura 3 – Esquema de forças agindo no plasma .....	27
Figura 4 – Geometria da trajetória do sinal .....	35
Figura 5 – DCB do satélite GPS G01 e da estação UFPR.....	36
Figura 6 – Fluxograma do processo.....	40
Figura 7 – Mapa de localização da BCAL .....	41
Figura 8 – Pilar 1000 – BCAL UFPR.....	42
Figura 9 – Exemplo de configuração para processamento no RINEX_HO .....	46
Figura 10 – Parâmetros de transformação.....	48
Figura 11 – DCB do receptor Leica 1200 .....	51
Figura 12 – Discrepância entre o valor do DCB calculado pelo IGS e propagado para a estação UFPR.....	53
Figura 13 – REQM X para o processamento de uma hora – experimentos 1 e 2 ....	58
Figura 14 – Diferenças entre os REQM X dos experimentos 1 e 2 para o processamento de uma hora.....	59
Figura 15 – REQM Y para o processamento de uma hora – experimentos 1 e 2 ....	59
Figura 16 – Diferenças entre os REQM Y dos experimentos 1 e 2 para o processamento de uma hora.....	60
Figura 17 – REQM Z para o processamento de uma hora – experimentos 1 e 2 ....	60
Figura 18 – Diferenças entre os REQM Z dos experimentos 1 e 2 para o processamento de uma hora.....	61
Figura 19 – REQM X, Y e Z para o processamento de uma hora – experimentos 3 e 4 .....	61
Figura 20 – REQM X para o processamento de duas horas – experimentos 1 e 2 .....	66
Figura 21 – Diferenças entre os REQM X dos experimentos 1 e 2 para o processamento de duas horas .....	66
Figura 22 – REQM Y para o processamento de duas horas – experimentos 1 e 2 .....	67
Figura 23 – Diferenças entre os REQM Y dos experimentos 1 e 2 para o processamento de duas horas .....	67

Figura 24 – REQM Z para o processamento de duas horas – experimentos 1 e 2 .....	68
Figura 25 – Diferenças entre os REQM Z dos experimentos 1 e 2 para o processamento de duas horas .....	68
Figura 26 – REQM X, Y e Z para o processamento de duas horas – experimentos 3 e 4 .....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Experimentos e suas características .....	39
Quadro 2 – Planejamento da propagação dos valores de DCB do receptor Leica 1200 .....	44
Quadro 3 – Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis GPS e correções empregadas no processamento .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.....	29
Tabela 2 – Levantamento GPS .....	43
Tabela 3 – Coordenadas Geodésicas do Pilar 1000 .....	47
Tabela 4 – Velocidades da estação UFPR.....	48
Tabela 5 – Valores do DCB do receptor GPS Leica 1200.....	50
Tabela 6 – Diferenças entre DCB do receptor da estação UFPR propagado e calculado .....	51
Tabela 7 – Diferenças entre as coordenadas da RBMC-UFPR calculadas e de referência.....	53
Tabela 8 – Discrepâncias e REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de uma hora .....	55
Tabela 9 – Média dos REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de uma hora .....	56
Tabela 10 – Discrepâncias e REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de uma hora .....	57
Tabela 11 – Média dos REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de uma hora .....	57
Tabela 12 – Discrepâncias e REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de duas horas .....	62
Tabela 13 – Média dos REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de duas horas.....	63
Tabela 14 – Discrepâncias e REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de duas horas .....	64
Tabela 15 – Média dos REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de duas horas.....	65

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BCAL/UFPR	Base de Calibração de Antenas GNSS da UFPR
CODE	ingl. <i>Center for Orbit Determination for Europe</i>
CORS	ingl. <i>Continuously Operating Reference Stations</i>
DCB	ingl. <i>Differential Code Bias</i>
DJM	Dias Julianos Modificados
DPB	ingl. <i>Differential Phase Bias</i>
ESA	ingl. <i>European Space Agency</i>
esp	Espanhol
GLONASS	ingl. <i>GLObal NAvigation Satellite System</i>
GNSS	ingl. <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	ingl. <i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	ingl. <i>International Earth Rotation and Reference Service</i>
IFB	ingl. <i>Inter-frequency Bias</i>
IGRF	ingl. <i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IGS	ingl. <i>International GNSS Service</i>
ingl.	Inglês
ITRF	ingl. <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
IONEX	ingl. <i>IONosphere map EXchange format</i>
JPL	ingl. <i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LAGEH	Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	ingl. <i>Precise Positioning Service</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GNSS
REQM	Raíz do Erro Quadrático Médio
RINEX	ingl. <i>Receiver INdependent EXchange format</i>
RINEX_HO	ingl. <i>RINEX Higher-Order</i>
SA	ingl. <i>Selective Availability</i>
SD	Simple Diferença
SGL	Sistema Geodésico Local
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SPS	ingl. <i>Standard Positioning Service</i>
STEC	ingl. <i>Slant TEC</i>
TEC	ingl. <i>Total Electron Content</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHF	ingl. <i>Ultra High Frequency</i>
UPC	esp. <i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>
UPD	ingl. <i>Uncalibrated Phase Delay</i>
VTEC	ingl. <i>Vertical TEC</i>

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	16
1.1 OBJETIVO GERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.3 JUSTIFICATIVA .....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	21
2.1 A IONOSFERA NO CONTEXTO DO POSICIONAMENTO GNSS .....	21
2.2 EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR .....	27
2.3 CÁLCULO DO TEC COM O GNSS .....	31
2.4 CÁLCULO DOS DCBS DE RECEPTORES .....	35
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.2 MATERIAIS.....	42
3.3 DETERMINAÇÃO DO DCB DO RECEPTOR .....	42
3.4 PROPAGAÇÃO NUMÉRICA DOS VALORES DE DCB .....	44
3.5 DETERMINAÇÃO DO TEC E CORREÇÃO DOS EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA .....	46
3.6 ANÁLISE DE ACURÁCIA DOS EXPERIMENTOS .....	46
4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES .....	50
4.1 RESULTADOS OBTIDOS NO CÁLCULO E PROPAGAÇÃO DOS VALORES DE DCB DO RECEPTOR GPS.....	50
4.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS COM DURAÇÃO DE UMA HORA NO PILAR 1000 .....	54
4.3 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS COM DURAÇÃO DE DUAS HORAS NO PILAR 1000.....	62
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	70
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	71
REFERÊNCIAS.....	73

## 1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, uma das tecnologias mais avançadas em relação a posicionamento e navegação é o GNSS (ingl. *Global Navigation Satellite System*), o qual engloba diversos sistemas, como o GPS (ingl. *Global Positioning System*), GLONASS (ingl. *GLObal NAVigation Satellite System*), Galileo, entre outros. Além do posicionamento, outras aplicações surgiram ao longo dos anos, como a estimativa do vapor d'água atmosférico, o TEC (ingl. *Total Electron Content*) na atmosfera, a detecção de movimentos crustais ou deformações da superfície terrestre com alta acurácia e resolução temporal, entre diversas outras aplicações (MONICO, 2008).

O sistema GPS, operacional desde 1985, oferece dois tipos de serviço: SPS (ingl. *Standard Positioning Service*) e PPS (ingl. *Precise Positioning Service*), sendo que este último é restrito ao uso militar. Tanto o SPS quanto o PPS são capazes de fornecer um bom nível de acurácia horizontal e vertical. Porém, até o dia 1º de maio de 2000, não era de interesse do governo dos Estados Unidos e de seus militares de que o SPS, quando utilizado para posicionamento por ponto simples, proporcionasse tal acurácia, por isso, o sinal era degradado pela SA (ingl. *Selective Availability*).

Mesmo com a desativação da SA, os sinais provenientes dos satélites do sistema GPS ainda passam por interferências, as quais acarretam erros no posicionamento. Atualmente, uma das fontes de erro no posicionamento com GPS é a camada da ionosfera, que é caracterizada como um meio dispersivo composta por íons e elétrons livres que afetam a propagação de ondas eletromagnéticas, as quais são transmitidas pelos satélites.

O erro devido à refração ionosférica é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera, que varia no tempo e no espaço e inversamente proporcional ao quadrado da frequência. O TEC é influenciado por variáveis como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, dentre outros (KLOBUCHAR, 1991).

Utilizando-se de receptores de dupla frequência é possível de se efetuar correções do efeito da ionosfera, pois o erro depende da frequência do sinal. Ao realizar a combinação linear livre de ionosfera entre as portadoras L1 e L2, é possível eliminar os efeitos de primeira ordem da refração ionosférica, os quais

representam 99% do atraso total provocado nas medidas e o restante é atribuído aos efeitos de ordem superior (MARQUES et al., 2014).

Os efeitos de segunda e terceira ordem geralmente são negligenciados no processamento dos dados GNSS. Estes efeitos devem ser corrigidos quando há exigência de resultados com alta acurácia, pois a não correção desses efeitos implica em erros residuais nas coordenadas da ordem de milímetros, podendo chegar a centímetros (FRITSCHE et al., 2005). Em razão disto, o IERS (ingl. *International Earth Rotation and Reference Systems Service*) recomenda por meio das convenções de 2010 que os centros de processamento de dados do ITRF (ingl. *International Terrestrial Reference Frame*) empreguem as correções dos efeitos ionosféricos de segunda e terceira ordem (IERS, 2010).

Se forem corrigidos os efeitos de ordem superior da refração ionosférica para um receptor itinerante, então haverá melhoria na acurácia do posicionamento com o receptor GPS. Marques (2008) implementou as formulações matemáticas para as correções de 2ª e 3ª ordem, o que resultou no desenvolvimento do software “RINEX\_HO (ingl. *RINEX Higher-Order*)”. A rotina corrige os efeitos de ordem superior da refração ionosférica diretamente nas observáveis presentes nos arquivos RINEX (ingl. *Receiver Independent EXchange format*).

O atraso no sinal GNSS que ocorre em função da tendência diferencial do código (DCB) é considerado um efeito instrumental decorrente da diferença entre o tempo de propagação das diferentes portadoras no hardware tanto dos satélites quanto dos receptores (HEGARTY et al., 2005; HONG, 2007).

Pode-se dizer que a estimativa dos valores de DCBs é uma parte significativa da modelagem da ionosfera utilizando GNSS. Além disso, sabe-se que os valores de DCB não são fixos, pois variam no tempo. O IGS (*International GNSS Service*) divulga os valores de DCB para o caso dos satélites GNSS e para os receptores que fazem parte da rede IGS por meio dos arquivos IONEX<sup>1</sup> (*IONosphere EXchange format*).

Ao longo dos anos, a estimativa dos DCBs dos satélites e dos receptores foi feita de diferentes formas, como por exemplo com mapas globais da ionosfera (SCHAER, 1999), simples diferença empregado no posicionamento relativo

---

<sup>1</sup> Os arquivos IONEX podem ser acessados gratuitamente por meio do endereço eletrônico: <<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/ionex>>. Acesso em 26 de outubro de 2018.

(CAMARGO et al., 2012), método Zero TEC (CORNELLY, 2013) e média aritmética da combinação linear livre de geometria (PROL e CAMARGO, 2014).

Esta pesquisa visa analisar a aplicação do método da simples diferença baseada na utilização de dois receptores, formando uma linha de base curta. A estação base utilizada é a estação UFPR (Universidade Federal do Paraná), parte integrante da rede IGS e também da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do sistema GNSS), então o valor do DCB do receptor para esta estação é conhecido e, logo, fez-se a estimativa do DCB do receptor itinerante. Obteve-se uma série temporal de valores de DCB deste receptor e, com dados de algumas épocas, fez-se a propagação numérica dos valores, ao longo de um determinado intervalo de tempo. Os valores obtidos tanto no cálculo quanto na propagação foram utilizados para estimativa do TEC no cálculo dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica, no contexto do PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), consequentemente contribuindo para a melhoria e obtenção de maior acurácia no posicionamento.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar a metodologia da simples diferença para o cálculo do valor do DCB de um receptor GPS e a integração numérica para propagação do mesmo no tempo, a fim de utilizá-los no cálculo dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica no PPP e analisar os resultados obtidos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter os valores do DCB de um receptor de forma relativa a outro valor de DCB disponibilizado pelo IGS e realizar uma série temporal de levantamentos GNSS, com intervalo semanal e com duração de 24 horas, a fim de obter dados para estudo de comportamento de valores do DCB do receptor itinerante;
- Realizar a propagação numérica dos valores de DCB estimados e avaliar os valores propagados para diferentes intervalos de tempo;

- Aplicar os valores de DCB propagados na estimativa do TEC para corrigir os efeitos de 2ª e 3ª ordem da refração ionosférica;
- Utilizar o serviço de PPP do software RTKLib e avaliar os PPPs realizados, também considerando as correções de refração ionosférica obtidas utilizando-se o valor propagado de DCB.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O posicionamento por satélites GNSS vem sendo cada vez mais utilizado ao passar dos anos para diversas atividades. Por isso, é de fundamental importância que sejam desenvolvidos estudos sobre as influências na acurácia do posicionamento, causadas pelas mais diversas fontes de erro sistemático, sendo que uma das maiores fontes de erro no posicionamento GNSS é a refração ionosférica.

A fim de corrigir os efeitos de refração ionosférica de primeira ordem, utilizando receptor de dupla frequência há a possibilidade de se fazer a combinação linear livre de ionosfera (*ion-free*). Para o caso dos efeitos de segunda e terceira ordem, é possível a utilização de modelagens matemáticas, como exemplo pode-se citar Bassiri e Hajj (1993). Quando se almeja no posicionamento resultados mais acurados, é imprescindível a consideração destes efeitos de ordem superior. Como exemplo, pode-se citar a recomendação do IERS (IERS, 2010) para o centro de processamento de dados do ITRF.

No software RINEX\_HO, desenvolvido por Marques (2008), há a opção de efetuar as correções com o TEC inclinado (STEC – ingl. *Slant* TEC) calculado para o local do posicionamento, tanto pela pseudodistância quanto pela pseudodistância filtrada pela fase. No processamento o usuário tem a opção de inserir o valor do DCB P1P2 (DCB entre os códigos P1 e P2) ou C1P2 (DCB entre os códigos C/A e P2) do receptor em nanossegundos. Assim sendo, há a possibilidade de previamente se estimar o DCB do receptor a partir de alguma das metodologias indicadas no item 2.4 do capítulo 2. No caso desta pesquisa, este procedimento foi adotado e utilizou-se a metodologia baseada no uso da simples diferença entre receptores, a fim de estimar o DCB de um receptor GPS, uma vez que o DCB do receptor da base é conhecido. Esta metodologia apresenta duas vantagens:

1. ao se utilizar o valor do DCB do receptor para o cálculo do TEC, este é estimado de maneira mais adequada; e
2. o TEC estimado é isento de erros provenientes da interpolação espaço-temporal que se tem quando são utilizados os arquivos IONEX provenientes de mapas globais da ionosfera.

O cálculo correto dos DCBs também é essencial para os serviços de navegação e posicionamento, principalmente para os usuários que requerem maior acurácia, pois melhora a estimativa do erro do relógio do receptor e auxilia na resolução das ambiguidades quando não se usa a observável *ion-free*. Além disso, os DCBs também são fatores importantes em aplicações precisas, como sondagem da ionosfera baseada em GNSS (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 1999; SCHAEER, 1999), posicionamento por ponto preciso (PPP) e resolução de ambiguidade no PPP, bem como estimativa de relógio de satélite GNSS (COLLINS et al. 2010; GE et al. 2017; LI et al., 2017).

Os DCBs variam no tempo e por isso há a necessidade de estimá-los periodicamente. Este procedimento faz com que mais trabalho de campo seja necessário. A fim de contornar isto, torna-se viável a análise da aplicação de propagação numérica nos valores estimados de DCB para uma determinada época. Assim, analisou-se a possibilidade de se estimar o DCB ocasionalmente. Ao final, foi analisada a acurácia dos posicionamentos com o GPS no contexto do PPP, a fim de verificar o ganho em relação à correção apenas dos efeitos de primeira ordem da refração ionosférica.

Logo, trata-se de um assunto de relevante interesse, visto que o Brasil está situado em região equatorial e tropical, onde os efeitos da refração ionosférica são caracterizados como sendo intensos, afetando significativamente os sinais GNSS e, conseqüentemente, a qualidade do posicionamento. Adicionalmente, sabe-se que nessa região do planeta ocorre a questão das irregularidades na ionosfera como a anomalia equatorial, a qual apresenta as maiores variações temporais e espaciais do TEC.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A IONOSFERA NO CONTEXTO DO POSICIONAMENTO GNSS

A atmosfera pode ser considerada como um conjunto de camadas gasosas e esféricas, sendo sua estrutura relacionada a elementos térmicos, químicos e eletromagnéticos. Seeber (2003) apresenta um esquema simplificado da atmosfera terrestre, dividida em função de temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas, (Figura 1). No caso do posicionamento GNSS, somente é relevante a divisão da atmosfera relacionada com a propagação de ondas de acordo com o meio dispersivo ou não. Desta forma, tem-se apenas a troposfera e a ionosfera.

Figura 1: Divisões da atmosfera terrestre.

Altura (km)	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação
100000	Termosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera
10000		Ionosfera		
1000	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera
100				
10	Troposfera			

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

A troposfera é a camada compreendida entre a superfície terrestre até aproximadamente 50 km de altura, sendo formada por partículas neutras, onde a maior concentração de gases ocorre em uma altura de até 12 km, composta por nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, argônio e vapor d'água. Este último, a pressão do ar e a temperatura formam o trio responsável pela propagação do sinal na atmosfera, sendo que a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma esteja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995). Neste caso, sinais UHF (ingl. *Ultra High Frequency*) cuja faixa de frequência compreende de 300 MHz a

3 GHz, onde se encontram os sinais GNSS, são propagados de forma não dispersiva na troposfera.

Ao contrário da troposfera, a ionosfera é um meio dispersivo, onde a propagação de sinais depende da frequência. Esta camada é caracterizada pela formação de íons e elétrons livres e, inicia-se aproximadamente a 50 km e estende-se até 1000 km de altura (HOFMANN-WELLENHOF, 2008). Nesta região, a densidade de íons e elétrons livres é suficiente para alterar a propagação de ondas de rádio, como aquelas transmitidas pelos satélites GNSS. A ionização da camada ionosférica é decorrente principalmente da radiação eletromagnética e corpuscular do Sol incidente na atmosfera superior (SILVA, 2013). Porém, conforme visto em Matsuoka et al. (2013), há também o fato do Sol emitir um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas, chamado de vento solar.

A ionosfera é categorizada em várias camadas, em particular D, E e F. A camada D (50-90 km) está presente apenas durante o dia, devido à baixa densidade eletrônica, causando deionização quase completa durante a noite (SILVA, 2013). A camada E (90-150km) possui a máxima condutividade elétrica, portanto é nela que se desenvolvem as correntes ionosféricas. A ionização da camada E, é causada pelos raios X e ultravioleta durante o dia, e pelos trilhos cósmicos e meteoros durante a noite (HOFMANN-WELLENHOF, 2008). Na camada F (150-1000 km), a ionização é máxima ao meio-dia e diminui em direção ao pôr-do-sol. A camada F se divide na região F1 e F2 durante o dia, sendo a F1 a mais baixa e a F2 a mais alta (SILVA, 2013). A densidade eletrônica máxima pode ser encontrada na camada F2. O atraso ionosférico tipicamente aumenta rapidamente em torno de 10 h no horário local e atinge o pico em torno de 14 h no horário local (WEBSTER, 1993).

Em razão das propriedades dispersivas da ionosfera, ao se propagarem nessa camada, as ondas eletromagnéticas podem ser refratadas, refletidas ou absorvidas. A fim de melhorar a acurácia no posicionamento GNSS e na navegação, os erros sistemáticos causados pela camada ionosférica devem ser determinados para o período de tempo em que as observações foram realizadas. Leick (1995) define os efeitos ionosféricos nas observações GNSS como: atraso de grupo e avanço de fase.

As observáveis (fase da onda portadora e pseudodistância) são determinadas com base na teoria de que a velocidade do sinal e o comprimento de onda são iguais aos valores válidos para uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo.

Todavia, em virtude das características físicas da ionosfera, seu índice de refração possui um valor não unitário. As equações (1) e (2) se referem às velocidades da fase e de grupo, respectivamente (SEEBER, 2003; CAMARGO, 1999):

$$v_f = \frac{c}{n_f} = \frac{c}{1 - \frac{40,3 n_e}{f^2}} \approx c \left( 1 + \frac{40,3 n_e}{f^2} \right), \quad (1)$$

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{1 + \frac{40,3 n_e}{f^2}} \approx c \left( 1 - \frac{40,3 n_e}{f^2} \right), \quad (2)$$

onde  $n_f$  é o índice de refração de fase,  $n_g$  é o índice de refração de grupo,  $n_e$  representa a densidade de elétrons e  $f$  é a frequência do sinal. Nota-se nas equações (1) e (2) que o índice de refração de grupo ( $n_g$ ) é sempre maior que o índice de refração da fase ( $n_f$ ), ocasionando, assim, um atraso na velocidade de propagação dos sinais GNSS para o grupo e um avanço na fase, que por sua vez provocam um aumento nas distâncias obtidas a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas a partir da fase.

De acordo com Hofmann-Wellenhof (2008), efeitos físicos diferentes afetam a propagação de ondas eletromagnéticas, como por exemplo, os efeitos de reflexão e refração. Na reflexão, ondas eletromagnéticas que encontram uma superfície são parcialmente refletidas (Figura 2). A onda incidente e a refletida, são simétricas à normal da superfície e, junto com ela, abrangem um plano (HOFMANN-WELLENHOF, 2008). Já a refração descreve a direção de propagação da mudança quando uma onda passa de um meio para outro. De acordo com a lei de Snell, citada por Hofmann-Wellenhof (2008), o seno do ângulo de incidência ( $\beta_i$ ) e o seno do ângulo de refração ( $\beta_r$ ) definem uma relação constante. Essa relação é equivalente à razão entre os índices de refração ( $n_i$ ) de ambos os meios:

$$\frac{\sin \beta_i}{\sin \beta_r} = \frac{n_2}{n_1} = \text{constante} . \quad (3)$$

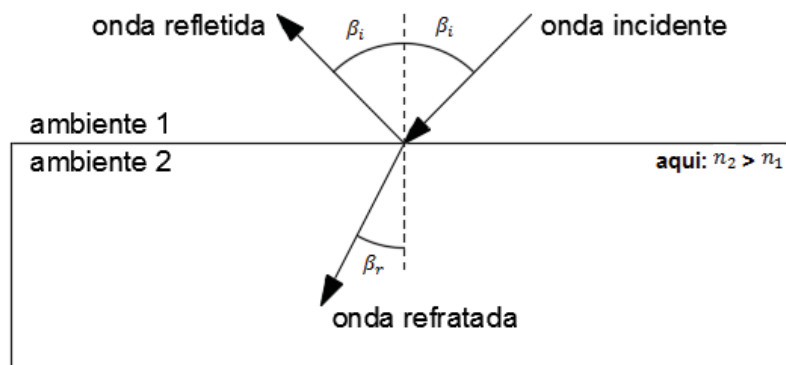
O índice de refração ( $n_i$ ) é definido como a razão entre a velocidade ( $v_i$ ) da onda em um meio e a velocidade da luz ( $c$ ) no vácuo:

$$n_i = \frac{c}{v_i}, \quad (4)$$

Portanto, a lei de Snell pode ser escrita na forma:

$$n_1 v_1 = n_2 v_2 = c. \quad (5)$$

Figura 2: Reflexão e refração de uma onda eletromagnética.



Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof (2008).

A magnitude do erro devido à refração ionosférica sobre os sinais GNSS depende da frequência do sinal e é diretamente proporcional ao TEC, que consiste no número de elétrons presentes ao longo da trajetória percorrida pelo sinal. Por causa da característica de variação do TEC, verifica-se a importância de compreender a teoria sobre o comportamento da ionosfera, como suas variações e distúrbios na densidade de elétrons, para que se faça possível o entendimento das limitações que podem ser causadas pela refração ionosférica na qualidade do posicionamento GNSS.

As variações temporais, que são todas aquelas que compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos, provocam diretamente uma mudança da densidade de elétrons na ionosfera (MATSUOKA, 2007). A variação diurna é causada pela mudança que ocorre na camada D, a qual desaparece no período noturno, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons.

A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano em uma determinada região, em parte porque o ângulo zenital do Sol tem uma variação sazonal e, também, devido às mudanças na atmosfera neutra da qual a ionosfera é criada (McNAMARA, 1991). De acordo com Matsuoka (2007), nos meses de março,

abril, setembro e outubro ocorrem os valores máximos da densidade de elétrons e os valores mínimos ocorrem no solstício de inverno.

As variações de longos períodos na densidade de elétrons são associadas às ocorrências de manchas solares, sucedendo um aumento da ionização o qual é proporcional ao número de manchas. Estas, associadas a intensos campos magnéticos do Sol, são regiões frias e escuras que podem ser vistas na superfície do mesmo, sendo cercadas por regiões brilhantes que emitem um nível elevado de radiação ultravioleta (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2000). Assim sendo, o incremento do número de manchas solares também incrementa a radiação solar, ocasionando uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. O número de manchas solares, causadas pelo aumento da atividade solar, está diretamente ligado ao valor do TEC (MARQUES et al., 2014).

Em relação às regiões geográficas, quando se leva em consideração a ionosfera, podem ser divididas em três: regiões de altas latitudes, regiões de médias latitudes e região equatorial. Contudo, não se pode estabelecer o valor exato da amplitude de cada região quando projetadas na superfície terrestre. A região de médias latitudes está localizada entre a região equatorial e de altas latitudes e é a região onde o comportamento da ionosfera é menos variável, mais regular e normalmente livre de irregularidades, sendo muito próxima de modelos ionosféricos clássicos (RODRIGUES, 2003). Entretanto, há muitos registros de tempestades geomagnéticas, que podem implicar em alguns impactos nos sinais GNSS nessa região. Próximas às regiões polares norte e sul encontram-se as regiões de altas latitudes. Nestas regiões, as comunicações via rádio são insatisfatórias, devido à variação espacial e temporal (McNAMARA, 1991). A atividade ionosférica na região equatorial e de baixas latitudes é altamente correlacionada com a hora local, se desenvolvendo por volta das 6-7 horas local e tendo sua máxima atividade registrada em torno de 14-15 horas local, onde se registra também os maiores valores de TEC globais (MATSUOKA, 2007). Nesta região, também se percebe vastos efeitos da cintilação ionosférica, degradando o desempenho de rastreamento dos receptores GNSS (EL GIZAWY, 2003). Um fenômeno que ocorre na ionosfera equatorial e de baixas latitudes é o chamado de anomalia equatorial (ou de Appleton).

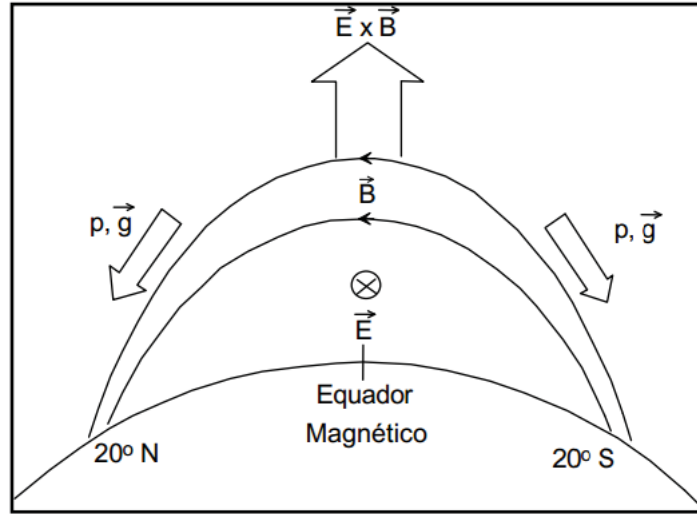
Próximo à superfície da Terra o campo magnético terrestre, ou campo geomagnético, pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de

rotação da Terra (FONSECA JUNIOR, 2002), contudo caso haja um abundante vento solar, as linhas de força do campo geomagnético sofrem alterações e tornam-se diferentes do modelo teórico. A variação da densidade de elétrons é influenciada pelo campo magnético da Terra, sendo que este controla o movimento das partículas ionizadas na ionosfera.

Outra questão que causa variações no TEC é a anomalia equatorial, também conhecida como anomalia de Appleton. Esta anomalia tem sua origem no efeito fonte, uma movimentação dos elétrons ao longo das linhas de força horizontais do campo geomagnético para longe do equador. Para descrever a anomalia equatorial, faz-se necessário a definição do efeito fonte. Os campos elétricos do dínamo atmosférico que são gerados na região E são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a região F, devido à alta condutividade paralela (MATSUOKA et al., 2013). Durante o dia, o campo elétrico (E) é direcionado para leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético (B) que é dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por  $E \times B / B^2$  (MATSUOKA et al., 2013). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético (MATSUOKA, 2007). Este movimento ocorre devido à ação da gravidade ( $\vec{g}$ ) e gradiente de pressão ( $\nabla p$ ). Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como Efeito Fonte (RODRIGUES, 2003). Um esquema das forças agindo no plasma é mostrado na Figura 3.

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e descida do plasma é que são formadas duas regiões de picos de densidade de elétrons nas regiões subtropicais, entre 10° e 20° de latitude geomagnética ao norte e ao sul. No equador geomagnético, a ionização fica menos intensa (MATSUOKA et al., 2013), resultando em gradientes de TEC na direção norte-sul. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial ou anomalia de Appleton (APPLETON, 1946).

Figura 3: Esquema das forças agindo no plasma – efeito fonte.



Fonte: Kelley (1989) apud Rodrigues (2003).

## 2.2 EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR

Conforme pode ser encontrado em Bassiri e Hajj (1993), Odijk (2002), Kedar et al. (2003) e Marques et al. (2011), o avanço da fase e o atraso do grupo são funções dependentes de três efeitos, conhecidos por efeitos ionosféricos de primeira, segunda e terceira ordem.

Incorporando-se os efeitos da ionosfera com as equações das observáveis de fase e pseudodistância, considerando  $\varphi_{Li}$  como sendo a equação das observáveis de fase e  $PD_{Li}$  da pseudodistância, em metros ( $i = 1,2$ ) tem-se (MONICO 2008; SEEBER, 2003):

$$\varphi_{Li} = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{\varphi Li} + T_{\varphi Li} + \lambda_{Li} N_{Li} + v_{\varphi Li}, \quad (6)$$

$$PD_{Li} = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{PD Li} + T_{PD Li} + v_{PD Li}, \quad (7)$$

onde,  $\rho_r^s$  é a distância geométrica entre o satélite (s) e o receptor (r),  $c$  é o módulo da velocidade da luz no vácuo,  $dt_r$  é o erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante de recepção do sinal,  $dt^s$  é o erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante de transmissão do sinal,  $I_{PD Li}$  e  $I_{\varphi Li}$  são os erros provocados pela refração ionosférica em L1 e L2 nas pseudodistâncias e nas fases

das ondas portadoras, respectivamente,  $T_{PDLi}$  e  $T_{\varphi Li}$  são os erros provocados pela refração troposférica em L1 e L2 nas pseudodistâncias e nas fases das ondas portadoras, respectivamente,  $\lambda_{Li}N_{Li}$  representa a ambiguidade da fase em L1 e L2 e  $v_{\varphi Li}$  e  $v_{PDLi}$  simbolizam os demais erros não modelados nas equações da fase e da pseudodistância, respectivamente.

Bassiri e Hajj (1993) e Odijk (2002) descrevem os efeitos de primeira, segunda e terceira ordem da refração ionosférica para a pseudodistância na frequência  $f_{Li}$  ( $i = 1,2$ ), como segue:

$$I_{gLi}^{(1)} = \frac{A}{2f_{Li}^2} \int N_e d\rho, \quad (8)$$

$$I_{gLi}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \int \|B\| |\cos \theta| N_e d\rho, \quad (9)$$

$$I_{gLi}^{(3)} = \frac{3A}{8f_{Li}^4} \int N_e^2 d\rho, \quad (10)$$

onde,  $A = \frac{e^2}{4\pi m_e \varepsilon_0}$ ,  $N_e$  é a densidade de elétrons livres em  $m^{-3}$ ,  $e = 1,60218 \times 10^{-19}$  *Coulomb* para a carga do elétron,  $m_e = 9,10939 \times 10^{-31}$  kg para a massa do elétron,  $\varepsilon_0 = 8,85419 \times 10^{-12}$  Farad/metro para a permissividade do espaço livre,  $B$  é o vetor de indução geomagnética e  $\theta$  é o ângulo que fornece a direção de propagação do sinal em relação ao vetor indução geomagnética ( $B$ ).

Sabe-se que o efeito ionosférico de primeira ordem da fase é igual ao do código, porém com sinais opostos. O mesmo ocorre para os efeitos de segunda e terceira ordem, contudo para a fase, esses efeitos representam, respectivamente, a metade e a terça parte dos efeitos do código (ODIJK, 2002).

Como visto na Equação (8), o atraso ionosférico de primeira ordem é uma função do termo  $\int N_e d\rho$  que representa o TEC ao longo da linha de visada entre o satélite e o receptor. Sendo assim, o atraso de primeira ordem, considerando  $A \approx 80,6 \text{ m}^3/\text{s}^2$ , é definido:

$$I_{gL_i}^{(1)} = \frac{A}{2f_{Li}^2} TEC = \frac{40,3}{f_{Li}^2} TEC , \quad (11)$$

A Tabela 1 apresenta o erro máximo na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras L1, L2 e para a combinação linear livre de ionosfera L3. Para direções inclinadas, a influencia aumenta em até 3 vezes, aproximadamente (SEEBER, 2003).

Tabela 1: Máximo efeito sistemático vertical devido à ionosfera.

Frequência	1ª ordem (1/f <sup>2</sup> )	2ª ordem (1/f <sup>3</sup> )	3ª ordem (1/f <sup>4</sup> )
<b>L1</b>	32,500 m	0,036 m	0,002 m
<b>L2</b>	53,500 m	0,076 m	0,007 m
<b>L3</b>	0,000 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Na Equação (9) verifica-se que o efeito de segunda ordem da ionosfera depende da indução geomagnética no ponto onde o sinal cruza a camada da ionosfera e do ângulo deste sinal em relação ao vetor de indução geomagnética. Para se calcular os efeitos de segunda e terceira ordem em função do TEC, podem ser feitas algumas simplificações, como assumir uma aproximação da ionosfera como uma simples camada, assim o produto  $\|B\|\cos\theta$  é constante ao longo do sinal e então a integral pode ser retirada da equação. Logo, o efeito de segunda ordem pode ser escrito da seguinte forma (ODIJK, 2002):

$$I_{gL_i}^{(2)} = \frac{eA}{f_{Li}^3 2\pi m_e} \|B\|\cos\theta TEC , \quad (12)$$

Em relação ao atraso ionosférico de terceira ordem, por causa do termo quadrático dentro da integral, a mesma fica inviável de se calcular. Em contrapartida, Odiijk (2002) apresenta uma aproximação para essa integral:

$$\int N_e^2 d\rho = \eta N_{e,max} TEC , \quad (13)$$

e, então, o atraso ionosférico de terceira ordem é descrito por:

$$I_{gLi}^{(3)} = \frac{3A^2}{8f_{Li}^4} \eta N_{e,max} TEC , \quad (14)$$

Apesar do cálculo do efeito de terceira ordem ser análogo aos de primeira e segunda ordens, ele é uma função da densidade máxima de elétrons  $N_{e,max}$  e um fator de forma  $\eta$ , cujo valor de 0,66 foi obtido por Odijk (2002).

No caso da correção dos efeitos de primeira ordem, para receptores de dupla frequência, uma alternativa é utilizar a combinação linear livre de ionosfera, que combina linearmente as frequências L1 e L2 das observáveis. Nas Equações (15) e (16) são apresentadas as combinações lineares livre de ionosfera (*ion-free*) para a fase da onda portadora ( $\varphi_{IF}$ ) e da pseudodistância ( $PD_{IF}$ ):

$$PD_{IF} = m_1 PD_{L1} + m_2 PD_{L2} , \quad (15)$$

$$\varphi_{IF} = m_1 \varphi_{L1} + m_2 \varphi_{L2} , \quad (16)$$

onde,  $m_1$  e  $m_2$  são os coeficientes multiplicadores da combinação.

Para que os efeitos de primeira ordem da refração ionosférica sejam eliminados, faz-se necessário que:

- 1) ao se realizar a combinação, os termos  $I_{\varphi_{L1,L2}}$  e  $I_{PD_{L1,L2}}$  devem ser cancelados. Para isso:

$$\frac{m_1}{f_{L1}} + \frac{m_2}{f_{L2}} = 0 , \quad (17)$$

- 2) a frequência da combinação linear deve ser a mesma da portadora L1, mas sem o efeito da refração ionosférica. Para isso:

$$m_1 f_{L1} + m_2 f_{L2} = f_1 , \quad (18)$$

Ao considerar as duas condições, os coeficientes  $m_1$  e  $m_2$  para o caso da fase da onda portadora são calculados por (GOAD e YANG, 1994):

$$m_{1\varphi} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong 2,5457, \quad (19)$$

$$m_{2\varphi} = \frac{f_1 f_2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong -1,9837, \quad (20)$$

No caso da pseudodistância, o índice  $m_1$  é adotado igual ao da fase e então obtém-se o índice  $m_2$ :

$$m_{1PD} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong 2,5457, \quad (21)$$

$$m_{2PD} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong -1,5457, \quad (22)$$

Sendo assim, as Equações (15) e (16) tornam-se:

$$PD_{IF} = 2,5457PD_{L1} - 1,5457PD_{L2}, \quad (23)$$

$$\varphi_{IF} = 2,5457\varphi_{L1} - 1,9837\varphi_{L2}, \quad (24)$$

Ao se eliminar o efeito de primeira ordem da refração ionosférica, os efeitos de segunda e terceira ordem são calculados utilizando as Equações (9) e (10).

### 2.3 CÁLCULO DO TEC COM O GNSS

Um parâmetro importante que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é o TEC, o qual representa o número de elétrons contidos em uma coluna com seção transversal de 1 m<sup>2</sup> que se estende desde o receptor até o satélite e normalmente apresentado em unidades de TEC (TECU), onde 1 TECU corresponde a 1 x 10<sup>16</sup> elétrons/m<sup>2</sup>. Ainda, Matsuoka e Camargo (2004) mostraram como converter o TEC em erro na distância medida com a fase e o código nas frequências L1 e L2, em metros, onde para L1, 1 TECU = 0,16 m e para L2, 1 TECU = 0,27 m.

Algumas pesquisas foram desenvolvidas no sentido de estimar o TEC a partir de observáveis GNSS, como pode ser visto em Camargo (1999), onde é possível verificar diferentes metodologias para o caso de receptores com uma e duas frequências. Dispondo-se de receptores de dupla frequência, é utilizada a combinação linear livre de geometria, formada pela subtração das observáveis provenientes das duas frequências. Esta combinação é assim chamada, uma vez que ao ser realizada, ocorre a eliminação da parte geométrica das equações, juntamente com a parte de erros de relógios, refração troposférica, e todos os demais erros não dependentes da frequência. Por exemplo, no caso das portadoras L1 e L2 tem-se para a pseudodistância e fase (MATSUOKA e CAMARGO, 2004):

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} [(\text{PD}_{2r}^s - \text{PD}_{1r}^s) - e_{\text{PD}_{12}}], \quad (25)$$

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} [(\lambda_2 \varphi_{2r}^s - \lambda_1 \varphi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - e_{\varphi_{12}}], \quad (26)$$

onde  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências da onda das portadoras L1 e L2, respectivamente,  $e_{\text{PD}_{12}}$  representa os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os comprimentos da onda das portadoras L1 e L2, respectivamente,  $N_{1r}^s$  e  $N_{2r}^s$  simbolizam as ambiguidades da fase das portadoras L1 e L2, respectivamente e  $e_{\varphi_{12}}$  representa os erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

Dentro dos termos  $e_{\text{PD}_{12}}$  e  $e_{\varphi_{12}}$  estão presentes os atrasos instrumentais interfrequência (IFB – do inglês *InterFrequency Bias*) do satélite e do receptor e os efeitos do multicaminho. O IFB é o atraso de hardware, no satélite ou receptor, causado pela diferença entre os caminhos percorridos pelas portadoras L1 e L2, afetando o tempo de propagação do sinal. Ainda segundo Hegarty et al. (2005) e Hong (2007), o IFB é decorrente da diferença entre o tempo de propagação das diferentes portadoras no hardware dos equipamentos. No caso dos códigos, de acordo com Mannucci et al., (1998) e Meza (1999), o IFB é denominado de tendência diferencial do código (DCB). No caso das fases, o IFB é denominado tendência diferencial da fase (DPB – do inglês *Differential Phase Bias*). Assim

sendo, as Equações (25) e (26) podem ser reescritas separando-se estes termos, da seguinte forma:

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (\text{PD}_{2r}^s - \text{PD}_{1r}^s) - c(\Delta b_{\text{PD}}^s + \Delta b_{r,\text{PD}}) - e_{\text{PD}_{12}} \right] \quad (27)$$

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)} \left[ (\lambda_2 \varphi_{2r}^s - \lambda_1 \varphi_{1r}^s) - (\lambda_1 N_{1r}^s - \lambda_2 N_{2r}^s) - c(\Delta b_{\varphi}^s + \Delta b_{r,\varphi}) - e_{\varphi_{12}} \right] \quad (28)$$

onde  $\Delta b_{\text{PD}}^s$  e  $\Delta b_{r,\text{PD}}$  são os DCB de satélite e receptor, respectivamente, e;  $\Delta b_{\varphi}^s$  e  $\Delta b_{r,\varphi}$  são os IFB para a fase de satélite e receptor, respectivamente. Cabe ressaltar que estas quantidades influenciam na estimativa do TEC. Conforme mencionado anteriormente, segundo Wilson e Mannucci (1994), o TEC, quando calculado a partir de medições GNSS, pode resultar em erros de  $\pm 3$  ns até  $\pm 10$  ns, respectivamente, quando o valor do DCB do satélite ou do receptor é ignorado. Desta forma, geralmente, os DCB dos satélites e receptores são parâmetros estimados, juntamente com o TEC nos modelos ionosféricos (PROL e CAMARGO, 2014).

Geralmente, devido à característica de natureza periódica do TEC, para a modelagem de seu comportamento diurno, são utilizadas séries matemáticas, funções de harmônicos esféricos ou até colocação por mínimos quadrados (CAMARGO, 1999; SCHAER, 1999; ORÚS et al., 2005; CAMARGO, 2009; BOUYA et al., 2010; LIU et al., 2011; ZHANG et al. 2013; ALIZADEH et al., 2015; MANSOUR, 2016; KRYPIAK-GREGORCZYK et al., 2017a; KRYPIAK-GREGORCZYK et al., 2017b).

Outra questão presente, é que no caso do uso da fase, há os termos relativos às ambiguidades, que no caso do posicionamento absoluto, via de regra, apresentam-se no domínio dos reais, devido ao próprio atraso do sinal ao passar pelos hardware de satélite e receptor, denominado de atraso não calibrado da fase (UPD – do inglês *Uncalibrated Phase Delay*), conforme pode ser visto em LIMA et al. (2016). No caso do uso das pseudodistâncias, os valores de TEC são calculados com um nível de ruído 10 vezes maior do que com as fases (SKONE, 1998). Como alternativa tem-se o uso das pseudodistâncias filtradas pelas fases das portadoras. Os detalhes de obtenção desta combinação podem ser vistas em Hatch (1983) e Jin

(1996). Cabe ressaltar que, neste caso, a combinação livre de geometria a ser utilizada é a mesma da pseudodistância (Equação 27). De acordo com as observáveis utilizadas nos cálculos, têm-se diferentes DCB, como o DCB entre o código P1 e o código P2 (DCBP1P2), o DCB entre os códigos C/A e P2 (DCBC1P2), ou o DCB entre os códigos C/A e P1 (DCBC1P1).

Desde 1998, o IGS, utilizando sua rede GNSS global, vem disponibilizando os chamados arquivos IONEX. Estes arquivos contêm valores de VTEC (ingl. *Vertical TEC*) para todo o globo terrestre, em forma de grade, com resolução espacial de 5° em longitude por 2,5° em latitude, com uma resolução temporal de 2 horas. Além dos valores de VTEC, os arquivos também contêm valores de DCB dos satélites e dos receptores da rede IGS. Os centros de análises do IGS que disponibilizam estes arquivos são o CODE (ingl. *Centre for Orbit Determination in Europe*), o JPL (ingl. *Jet Propulsory Laboratory*), o UPC (esp. *Universitat Politècnica de Catalunya*) e a ESA (ingl. *European Space Agency*).

O VTEC é obtido a partir da consideração de uma função de mapeamento. Na função de mapeamento geométrica padrão, tem-se (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001):

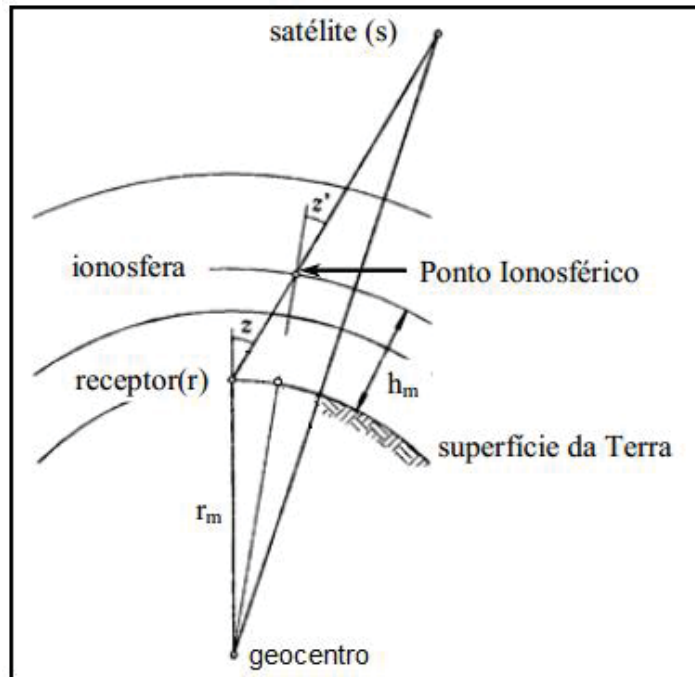
$$\text{VTEC} = \cos(z') \text{TEC}, \quad (29)$$

sendo que:

$$\sin(z') = \frac{r_m}{r_m + h_m} \sin(z), \quad (30)$$

onde  $z$  é o ângulo zenital do trajeto entre o satélite e o receptor,  $z'$  é o ângulo zenital entre o satélite e o ponto ionosférico,  $r_m$  é o raio médio da Terra e  $h_m$  é a altura média da camada da ionosfera, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Geometria da trajetória do sinal GPS.



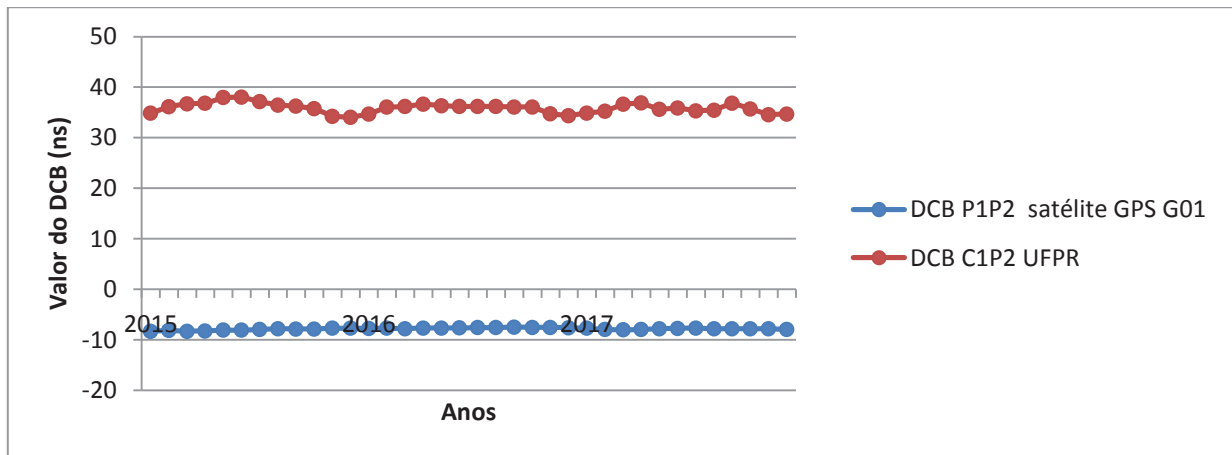
Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof (2008).

## 2.4 CÁLCULO DOS DCBS DE RECEPTORES

Conforme mencionado anteriormente, para o cálculo do TEC a partir de observáveis GNSS, devem-se calcular juntamente os valores de DCB de receptor e de satélite, ou, conhecer os valores a priori e inserí-los no modelo. Choi et al. (2013) indica que é necessário um cálculo com precisão dos valores de DCB pois este pode afetar o cálculo do TEC.

Choi et al. (2011) mostraram que os DCBs, tanto de satélites quanto de receptores, estimados a partir de medições GNSS, podem atingir até algumas dezenas de nanossegundos. Os DCBs de satélites GNSS têm uma estabilidade de longo prazo, com um desvio padrão de cerca de 0,2 ns (Wilson e Mannucci, 1994). Os valores de DCB dos receptores tendem a variar mais do que os dos satélites, como visto, por exemplo, em Prol e Camargo (2014). Na Figura 5 é possível observar um gráfico o qual ilustra os valores de DCB para o satélite GPS PRN01 (G01) ao longo dos anos de 2015, 2016 e 2017 e apresenta um desvio padrão de 0,21 ns; ilustra também os valores de DCB para a estação UFPR, que apresenta um desvio padrão de 0,967 ns.

Figura 5: DCB do satélite GPS G01 e da estação UFPR.



Fonte: A autora (2019).

Porém, conforme pode ser visto em Kao et al. (2013), os valores de DCB são afetados por fatores como localização, modelo ionosférico e estratégia de processamento dos dados. Outro fator apontado por Zhang et al. (2009) é a ocorrência de tempestades geomagnéticas. Ainda segundo Gao e Liu (2002), os DCBs de receptores são também influenciados pela temperatura do hardware. Zhang et al. (2010) demonstraram que o comportamento dos DCBs também se altera de acordo com a latitude, isto é, com diferentes comportamentos da ionosfera.

Em concordância com o item 2.3, os DCBs podem ser calculados simultaneamente com o TEC (ou com os parâmetros que definem a variação temporal do TEC), dentro de um modelo ionosférico, utilizando estratégias de injeção. Porém, quando se trata especificamente da estimativa de valores de DCB de receptor, há três metodologias. A primeira, conforme indica Prol e Camargo (2014), é dispor de valores de VTEC e de DCB do satélite, por exemplo, extraídos de arquivos IONEX, disponibilizados por algum centro de processamento do IGS. Sabe-se que a partir de arquivos IONEX, podem-se interpolar valores de VTEC para a região de interesse. Assim sendo, ao utilizar-se a Equação (27) para uma determinada época ter-se-á o valor de DCB do receptor para algum par de códigos (DCBP1P2, por exemplo). Esta metodologia foi utilizada por Arikan et al. (2008) no método IONOLAB-BIAS. Considerando a estimativa a partir de diferentes épocas de observáveis, Montenbruck et al. (2014) e Prol e Camargo (2014), utilizaram uma técnica baseada na média aritmética dos valores obtidos a partir da metodologia mencionada. Neste caso tem-se:

$$c\Delta b_{r,PD} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[ (PD_{2r}^s - PD_{1r}^s)_k - \frac{TEC_k}{F} - c\Delta b_{PD}^s \right], \quad (31)$$

sendo:

$$F = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,3(f_1^2 - f_2^2)}, \quad (32)$$

onde  $k$  é o instante medido e  $n$  é o número de observações. Ainda, para este cálculo, utiliza-se a pseudodistância filtrada pela fase e o TEC calculado pela combinação linear livre de geometria. Os demais termos foram mencionados anteriormente. Cabe ressaltar que para minimizar os efeitos oriundos do multicaminhamento, é recomendado um período de aproximadamente 24 horas para os rastreios GPS, pois há a repetição da geometria dos satélites (VISKI, 2012).

Ainda dentro do contexto da primeira metodologia, há também a possibilidade de considerar valores a priori do atraso ionosférico em épocas de atividade solar mínima e estimar o DCB em conjunto para o satélite e o receptor. Cornely (2013) utilizou esta técnica, considerando o valor do atraso ionosférico aproximadamente igual à zero em períodos noturnos.

A segunda metodologia é baseada na aplicação da Simples Diferença (SD) entre dois receptores dispostos em linhas de base curtas (CAMARGO et al., 2012). Uma vez que a influência da ionosfera é considerada a mesma para as duas estações, não há a utilização de um modelo ionosférico, e, por consequência não é necessário o conhecimento do valor do TEC e nem do DCB do satélite. Ambos são cancelados na formação da SD, onde se considera que os sinais GNSS são rastreados simultaneamente em cada um dos receptores. Porém, ao se realizar a mesma, obtém-se a diferença entre o DCB do receptor da base e o DCB do receptor itinerante. Isto é, um valor relativo de DCB entre as estações. Somente se o valor do DCB do receptor da base for conhecido, ou arbitrado com um valor de referência, o valor do DCB do receptor itinerante será estimado. Cabe ressaltar que os valores de erros de multicaminhamento e de ruído dos receptores estarão presentes. Neste caso, tem-se para receptores  $r_1$  e  $r_2$ , e um satélite  $s$ :

$$\begin{aligned}
& F SD_{(PD_{2r1}^s PD_{1r1}^s), (PD_{2r2}^s PD_{1r2}^s)} \\
& = [TEC_{r2} + F(c\Delta b_{r2,PD} + c\Delta b_{PD}^s + e_{PD_{r2}})] \\
& - [TEC_{r1} + F(c\Delta b_{r1,PD} + c\Delta b_{PD}^s + e_{PD_{r1}})],
\end{aligned} \tag{33}$$

onde  $SD_{(PD_{2r1}^s PD_{1r1}^s), (PD_{2r2}^s PD_{1r2}^s)}$  é a SD das combinações livre de geometria para os receptores  $r_1$  e  $r_2$ . Uma vez que  $TEC_{r1} = TEC_{r2}$ , tem-se:

$$SD_{(PD_{2r1}^s PD_{1r1}^s), (PD_{2r2}^s PD_{1r2}^s)} = c\Delta b_{r2,PD} - c\Delta b_{r1,PD} + e_{PD_{r2r1}}, \tag{34}$$

sendo:

$$e_{PD_{r2r1}} = e_{PD_{r2}} - e_{PD_{r1}}, \tag{35}$$

Tendo-se o valor do DCB do receptor  $r_1$ , estima-se o valor do DCB do receptor  $r_2$ , em metros, para uma determinada época por:

$$c\Delta b_{r2,PD} = SD_{(PD_{2r1}^s PD_{1r1}^s), (PD_{2r2}^s PD_{1r2}^s)} + c\Delta b_{r1,PD} - e_{PD_{r2r1}}, \tag{36}$$

Dentro do contexto desta segunda metodologia, ressalta-se que quanto maior a linha de base, maior a diferença no comportamento da ionosfera nas estações e mais erro será propagado para o valor do DCB do receptor. Como exemplo de aplicação desta metodologia, cita-se Hong et al. (2008), que estabeleceram linhas de base de até 200 km, utilizando estações da rede CORS (ingl. *Continuously Operating Reference Stations*) em Ohio. Nestes experimentos, a discrepância média entre os valores estimados e os de referência foi de 4 cm. Um caso específico particular é o caso da linha de base zerada, onde, com uso de um divisor de sinais GNSS uma única antena é conectada a diferentes receptores. Neste caso, a influência do multicaminhamento é suprimida.

A terceira metodologia diz respeito à estimativa eletrônica dos DCBs, a partir de calibração. Exemplos de aplicação desta metodologia podem ser vistos em Banville et al. (2008) e em Ammar et al. (2018), utilizando um simulador de sinais. Neste último trabalho citado, os desvios dos valores estimados para os valores divulgados pelo IGS apresentou-se em média de 3 ns.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia empregada neste trabalho de pesquisa. Primeiramente, foram realizados os cálculos dos valores de DCB de um receptor GPS com base no método da simples diferença. Posteriormente, realizou-se a etapa do cálculo dos valores de TEC e da correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica nas observáveis dos arquivos RINEX, para cada dia de rastreo.

Após estas etapas, a fim de investigar a ideia de otimização do trabalho em campo, realizou-se a propagação numérica dos valores de DCB. Para validar este experimento, testes foram realizados com base nos valores provenientes dos arquivos IONEX para a estação UFPR. Por fim, foram feitos processamentos no contexto do PPP, utilizando o software RTKLIB 2.4.2, desenvolvido por Takasu (2009). Isso com a finalidade de analisar as possíveis melhorias na acurácia planialtimétrica com as correções dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica, usando-se os valores de TEC calculados a partir dos DCBs obtidos com o cálculo e com a propagação. Neste contexto, foram organizados os experimentos delineados no Quadro 1.

Quadro 1: Experimentos e suas características.

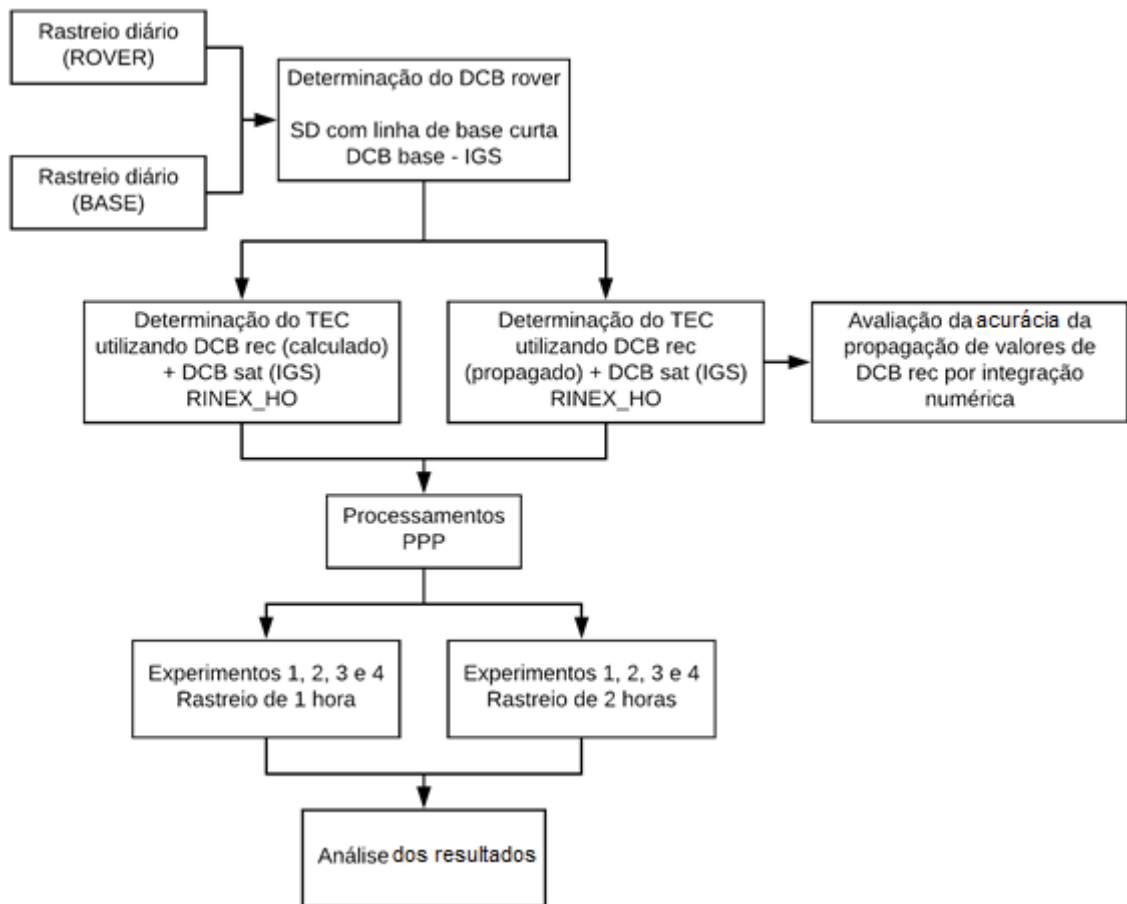
<b>Experimento</b>	<b>Características</b>
1	PPP com correção dos efeitos de primeira ordem da refração ionosférica
2	PPP com correção de ordem superior da refração ionosférica com a determinação do TEC utilizando DCB (receptor) calculado
3	PPP com correção de ordem superior da refração ionosférica com a determinação do TEC utilizando DCB (receptor) propagado por três semanas
4	PPP com correção de ordem superior da refração ionosférica com a determinação do TEC utilizando DCB (receptor) propagado por quatro semanas

Fonte: A autora (2019).

A Figura 6 representa um fluxograma dos processos descritos. No experimento 1, realizou-se um PPP com correção apenas dos efeitos de primeira ordem da refração ionosférica. No experimento 2, foi realizado um PPP com correção dos efeitos de primeira, segunda e terceira ordem da refração ionosférica, utilizando o DCB do receptor calculado previamente. Nos experimentos 3 e 4, foram feitos PPPs com as mesmas correções do experimento 2, porém utilizando o DCB do receptor propagado de três e quatro semanas, respectivamente. Os experimentos foram realizados utilizando-se rastreios de 1 e 2 horas.

Após, efetuou-se as análises e comparações dos resultados obtidos a partir da realização dos diferentes experimentos.

Figura 6: Fluxograma do processo.

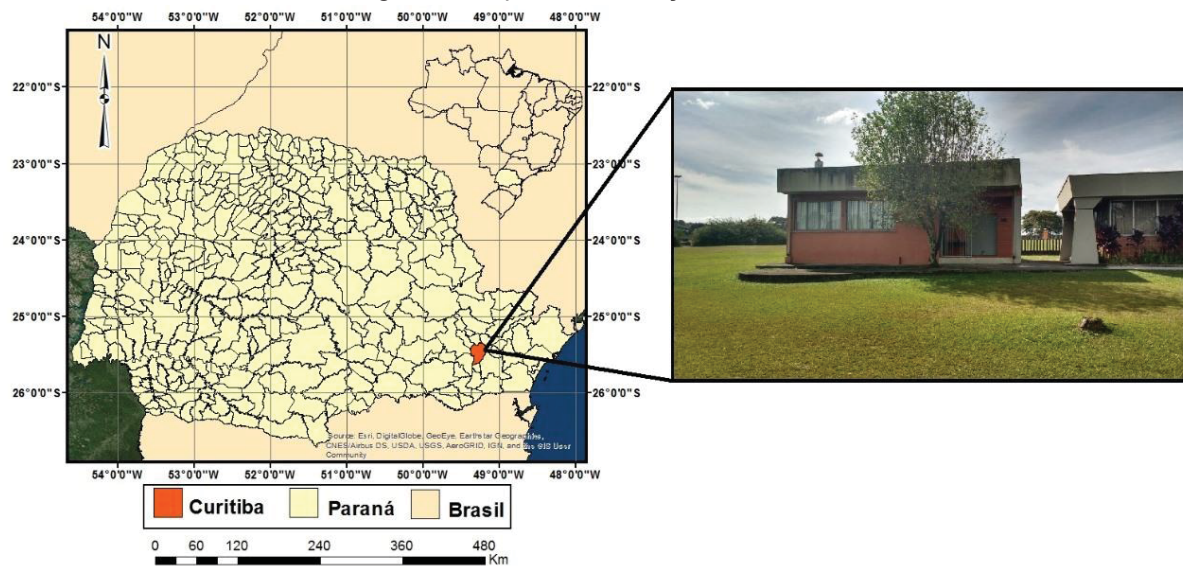


Fonte: A autora (2019).

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para o levantamento dos dados da pesquisa foi a Base de Calibração de Antenas GNSS – BCAL, situada ao lado do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia – LAGEH, nas dependências do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, no município de Curitiba – Paraná (Figura 7).

Figura 7: Mapa de localização da BCAL.



Fonte: A autora (2019).

A BCAL, que fica na laje do auditório ao lado do LAGEH, possui três pilares de concreto com dispositivos de centragem forçada, são eles: Pilar 1000, Pilar 2000 e Pilar 3000, conforme apresentado na Figura 8. Este local foi escolhido, pela sua adequação à prática de levantamentos GNSS científicos, uma vez que apresenta segurança e poucas obstruções no entorno. O pilar adotado para a instalação do equipamento foi o Pilar 1000, tendo em vista a disponibilidade de uso no LAGEH.

Figura 8: Pilar 1000 – BCAL UFPR.



Fonte: A autora (2019).

### 3.2 MATERIAIS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado um receptor GPS Leica 1200, de propriedade da UFPR, sob responsabilidade do Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia; além dos softwares Leica Geo Office<sup>2</sup>, RINEX\_HO<sup>3</sup>, RTKLIB<sup>4</sup> e MATLAB<sup>5</sup>.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO DCB DO RECEPTOR

Para a aquisição das observações, foi utilizado o receptor GPS com o método relativo estático, cuja estação base é a UFPR, em 19 sessões de aproximadamente 24 horas cada, com intervalo de gravação dos dados de 15 segundos e máscara de elevação configurada para 10°. As sessões foram feitas a cada sete dias, totalizando um período de cinco meses de coleta. Nesta configuração, a linha de base possui aproximadamente 40 metros, considerada curta. Os arquivos RINEX destes rastreios foram gerados com o software Leica Geo Office.

Com o objetivo de calcular o DCB, foi desenvolvida uma rotina em ambiente MATLAB, seguindo a formulação apresentada na equação (36), utilizando a

<sup>2</sup> Licença disponível para uso estudantil no Laboratório de Topografia Informatizada da UFPR.

<sup>3</sup> Disponível para download gratuito em [https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/RINEX\\_HO.htm](https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/RINEX_HO.htm). Acesso em 20 de outubro de 2018.

<sup>4</sup> Disponível para download gratuito em <http://www.rtklib.com>. Acesso em 20 de outubro de 2018.

<sup>5</sup> Licença disponível para uso estudantil no Laboratório de Topografia Informatizada da UFPR.

pseudodistância filtrada pela fase. Com os valores de DCB estimados a cada época do rastreo, foram calculadas as médias diárias da seguinte forma:

$$\overline{c\Delta b}_{r_{rover},PD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [SD_{(PD_{2r_{UFPR}}^s PD_{1r_{UFPR}}^s), (PD_{2r_{rover}}^s PD_{1r_{rover}}^s)}_i + c\Delta b_{r_{UFPR},PD}], \quad (37)$$

onde  $\overline{c\Delta b}_{r_{rover},PD}$  é a média diária dos DCBs do receptor itinerante em metros,  $SD_{(PD_{2r_{UFPR}}^s PD_{1r_{UFPR}}^s), (PD_{2r_{rover}}^s PD_{1r_{rover}}^s)}_i$  é a  $i$ ésima simples diferença em metros,  $n$  é o número de épocas do rastreo,  $c\Delta b_{r_{UFPR},PD}$  é o DCB da estação UFPR em metros. Cabe ressaltar que, conforme mencionado anteriormente, na ocasião do cálculo da média aritmética da combinação linear livre de geometria, em rastreios de aproximadamente 24 horas a influência do efeito de multicaminho tende a zero. Na Tabela 2 são encontradas informações sobre os levantamentos GPS executados e empregados na pesquisa.

Tabela 2: Levantamento GPS.

<b>DIA DA COLETA</b>	<b>Nº DO DIA NO ANO</b>	<b>HORA DE INÍCIO TEMPO GPS</b>	<b>DURAÇÃO</b>
13/11/2017	317	13:20:52	24h 20' 24"
21/11/2017	325	16:44:02	24h 29' 53"
28/11/2017	332	17:08:59	24h 04' 42"
05/12/2017	339	14:49:13	27h 54' 06"
11/12/2017	345	10:58:59	24h 13' 12"
18/12/2017	352	10:13:36	24h 35' 51"
26/12/2017	360	11:07:29	30h 47' 45"
02/01/2018	2	10:55:37	24h 22' 58"
08/01/2018	8	12:06:30	24h 34' 05"
15/01/2018	15	09:24:46	25h 16' 26"
22/01/2018	22	09:58:07	48h 49' 30"
06/02/2018	36	00:27:21	23h 55' 35"
13/02/2018	44	21:25:07	26h 47' 57"
19/02/2018	50	11:35:42	24h 00' 48"
26/02/2018	57	12:26:52	46h 39' 31"
05/03/2018	64	16:03:07	24h 42' 04"
12/03/2018	71	12:15:15	24h 09' 45"
27/03/2018	86	12:04:59	24h 03' 53"
03/04/2018	93	11:46:44	6h 38' 58"

Fonte: A autora (2019).

### 3.4 PROPAGAÇÃO NUMÉRICA DOS VALORES DE DCB

Seguindo a metodologia proposta neste trabalho, por conta das variações nos valores do DCB dos receptores, o mesmo deve ser calculado previamente toda vez que houver a necessidade de cálculo do TEC para a correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica. Logo, faz-se necessário trabalho em campo adicional. Para evitar tal procedimento, analisou-se a ideia de utilizar os valores de DCB propagados via integração numérica.

A integração numérica é caracterizada por ser um processo computacional para a estimativa de um valor numérico de uma função sobre um conjunto matemático. Com os valores semanais de DCB do receptor Leica 1200 calculados, fez-se a propagação por integração numérica de algumas semanas específicas para que fosse possível uma investigação. Para não ter um alto volume de dados, nem todas as semanas foram propagadas, conforme apresentado no Quadro 2. A cor verde indicada no quadro mostra a semana em que foi utilizado o valor de DCB do receptor usado para a propagação por 3 e 4 semanas (7 e 14 dias, respectivamente).

Quadro 2: Planejamento da propagação dos valores de DCB do receptor Leica 1200.

Nº DO DIA NO ANO	PROPAGAÇÃO		Nº DO DIA NO ANO	PROPAGAÇÃO
317/2017			22/2018	
325/2017			36/2018	4ª semana
332/2017			44/2018	
339/2017	3ª semana		50/2018	
345/2017	4ª semana		57/2018	3ª semana
352/2017			64/2018	4ª semana
360/2017			71/2018	
2/2018	3ª semana			
8/2018	4ª semana		86/2018	3ª semana
15/2018			93/2018	4ª semana

Fonte: A autora (2019).

O método de integração numérica utilizado foi o Runge-Kutta de ordem 7(8), com coeficientes de Fehlberg (FEHLBERG, 1968), com passo de integração fixo até uma época específica, conforme indicado por Morescki Jr (2015). A taxa de variação temporal para o DCB entre dois rastreios quaisquer foi definida como:

$$\frac{dDCB}{dt} = \frac{DCB_1 - DCB_0}{t_1 - t_0}, \quad (38)$$

onde  $DCB_0$  é o valor do DCB inicial em nanossegundos,  $DCB_1$  é o valor do DCB da semana posterior ao DCB inicial e  $t_0$  e  $t_1$  representam o tempo do dia referente ao DCB inicial e da semana posterior, respectivamente, (ano, mês, dia, horas, minutos e segundos) em Dias Julianos Modificados (DJM). Então, a equação geral para a propagação dos DCBs é:

$$DCB_i = DCB_{i-1} + \frac{dDCB}{dt} \Delta t, \quad (39)$$

sendo que o sub-índice ( $i$ ),  $i = 1, 2, 3 \dots$ , corresponde à semana escolhida a ter seu DCB propagado e  $\Delta t$  é o tempo de propagação em DJM.

Visando a validação da metodologia, os valores de DCB propagados foram comparados aos valores de DCB para a mesma época, utilizando como teste a estação da RBMC UFPR, visto que a mesma tem seus valores diários de DCB disponibilizados pelo IGS. O DCB inicial foi o do dia 1º de agosto de 2017, propagado até o dia 31 do mesmo mês e ano, sendo que no dia 25 não houve registro do DCB pelo IGS.

Adicionalmente, foi realizado um PPP modo estático pela plataforma online do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o aplicativo online IBGE-PPP, para que fosse possível analisar a diferença na acurácia com correção de ordem superior da refração ionosférica utilizando o TEC calculado com os DCBs divulgados pelo IGS e com os DCBs propagados. O processamento foi feito com máscara de elevação de 10°, utilizando a observável combinada livre de ionosfera (L3). O aplicativo online IBGE-PPP disponibiliza como resultado as coordenadas referenciadas ao Sistema de Referência SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) 2000 na época 2000,4, utilizando o modelo de velocidade VEMOS2009.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DO TEC E CORREÇÃO DOS EFEITOS DE ORDEM SUPERIOR DA REFRAÇÃO IONOSFÉRICA

Com os valores calculados e propagados dos DCBs do receptor tornou-se possível o cálculo dos valores de TEC. No caso de utilizar o valor calculado do DCB, o TEC foi calculado para o dia do rastreamento. Todavia, no caso da utilização dos DCBs propagados de uma a três semanas, o TEC foi estimado para as respectivas datas finais de propagação. Todos os cálculos do TEC foram feitos internamente pelo software RINEX\_HO, utilizando a pseudodistância filtrada pela fase. Os arquivos foram processados com máscara de elevação de 15°, isto é, todas as observáveis provenientes de satélites com elevação maior ou igual a 15° foram corrigidas. Um exemplo de configuração para o processamento no RINEX\_HO pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Exemplo de configuração para processamento no RINEX\_HO.

```

./RINEX/21sem0.18o           //obs file
./RINEX/21sem0.18n           //nav file
./RINEX/21semcor.18o         //new obs file
./RINEX/21semcor_OutP        //Start name of output files
3763726.08 -4365121.34 -2724431.25 //Receiver coordinates
15                             //Elevation Mask
1                               //Save output and log files (yes=1; no=0)
1                               //1 = TEC from smoothed pseudorange by phase
./RINEX/CODG0930.18I         //Name of the CODE map
0.0000000775869250618830     //DCB (P1-P2) = receiver bias in ns
./RINEX/P1C11804.DCB         //DCB (P1-C1) - P1C1 bias
./RINEX/P1P21804.DCB         //DCB (P1-P2) - P1P2 bias for satellites
0                               //0 = Dipolar model; 1 = CGM from PIM; 2 = IGRF model
./RINEX/IGRF12.COF           //Name of the IGRF coefficients

```

Fonte: A autora (2019).

Com os valores de TEC calculados, obtiveram-se os arquivos RINEX corrigidos, contendo as compensações dos efeitos de segunda e terceira ordem da refração ionosférica nas observáveis.

### 3.6 ANÁLISE DE ACURÁCIA DOS EXPERIMENTOS

A fim de analisar a acurácia planialtimétrica obtida com as correções dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica, usando-se os valores de TEC calculados a partir dos DCBs calculados e propagados, os experimentos descritos no Quadro 1 foram realizados. Os processamentos foram efetuados no software

RTKLIB, PPP modo estático, com intervalo de aquisição dos dados de 15 segundos, máscara de elevação de 15°, com as efemérides e relógios dos satélites precisos e processados com a combinação linear livre de ionosfera (L3). Adicionalmente, as correções aos erros sistemáticos foram feitas dentro do software RTKLIB conforme apresentado no Quadro 3. Além disso, optou-se pelo processamento de uma e duas horas, onde foi escolhido o período das 15 às 17 horas local, horário onde há menos irregularidades na atmosfera, apesar da intensa atividade ionosférica no Brasil.

Quadro 3: Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis GPS e correções empregadas no processamento.

<b>FONTE DE ERRO</b>	<b>ERRO ATUANTE</b>	<b>CORREÇÃO/ATENUAÇÃO</b>
Satélite	Relógio do satélite	Relógio preciso
	Órbita	Efemérides precisas (final)
Propagação do sinal	Ionosfera	Combinação linear livre de ionosfera e correção dos efeitos de ordem superior
	Troposfera	Modelo de Saastamoinem
	Efeito de multicaminho	Máscara de elevação
Receptor/Antena	Relógio do receptor	Emprego da fase da onda portadora
	Fase Windup	Modelo matemático
	Efeitos do DCB P1C1	Arquivos .dcb com os valores calculados pelo IGS
	Varição do centro de fase da antena	Arquivos .atx (ANTEX) com PCO e PCVs das antenas dos satélites e do receptor
Geodinâmica	Maré	Modelo matemático
	Carga oceânica	Modelo FES2004
	Movimento do polo	Arquivo .erp com os parâmetros de orientação da Terra

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Após a realização dos experimentos, fez-se a comparação das coordenadas obtidas com as coordenadas de referência. Esta última, indicada na Tabela 3, referenciada ao Sistema de Referência Terrestre SIRGAS 2000, na época 2000,4.

Tabela 3: Coordenadas Geodésicas do Pilar 1000.

	<b>Pilar 1000</b>	<b>Desvio padrão (m)</b>
<b>Latitude</b>	-25° 26' 55,05943"	0,0013
<b>Longitude</b>	-49° 13' 52,30662"	0,0013
<b>Altitude Elipsoidal</b>	927,2627 m	0,0046

Fonte: HUINCA (2009).

Como ao final do processamento no PPP o software RTKLIB fornece as coordenadas geodésicas do ponto no Sistema de Referência Terrestre adotado nas efemérides precisas (ITRF14-IGS 14), referidas à época em que os dados foram coletados, foi necessário fazer a transformação das coordenadas para o Sistema de Referência SIRGAS 2000 na época 2000,4. O relacionamento entre a realização do ITRF e o SIRGAS 2000 se dá através de uma transformação de sete parâmetros (transformação de Helmert – três translações, três rotações e um fator de escala). Os valores dos parâmetros, que podem ser encontrados em IBGE (2017), são apresentados na Figura 10.

Figura 10: Parâmetros de transformação.

Realização	Parâmetros de Transformação						
	T x (cm)	T y (cm)	T z (cm)	Escala (ppb)	Rx (mas)	Ry (mas)	Rz (mas)
ITRF (IGb00) > SIRGAS	0.54	0.22	0.27	0.00	-0.070	0.020	0.170
ITRF (IGS05) > SIRGAS	0.51	0.65	0.99	0.00	-0.150	0.020	0.021
ITRF (IGS08) > SIRGAS	0.25	0.43	0.46	-1.10	0.140	-0.010	0.080
ITRF (IGb08) > SIRGAS	0.20	0.41	0.39	-1.00	0.170	-0.030	0.070
ITRF (IGS14) > SIRGAS	0.26	0.18	-0.61	-0.05	0.308	0.106	-0.096

Fonte: IBGE (2017).

Primeiramente realizou-se a transformação de coordenadas geodésicas para cartesianas, seguindo a formulação apresentada por Rodrigues (2002). Em seguida, aplicou-se a transformação de sete parâmetros para passar de ITRF14 para SIRGAS 2000, para a época do rastreamento, seguindo a formulação apresentada por Sapucci e Monico (2000). Posteriormente, realizou-se a transformação de coordenadas cartesianas para o Sistema Geodésico Local (SGL), seguindo a formulação apresentada por Monico (2008), utilizando como origem a estação UFPR. E por último, fez-se possível a redução das coordenadas para a época 2000,4 no SIRGAS 2000, seguindo a formulação apresentada por Drewes (2004), utilizando as velocidades disponibilizadas pelo IBGE (Tabela 4).

Tabela 4: Velocidades da estação UFPR.

Velocidade Planimétrica – UFPR (m/ano)	
Norte	0,01306
Leste	-0,00396
Altura	-0,00081

Fonte: IBGE (2019).

Após a obtenção das diferenças e dos desvios-padrão em cada experimento, a acurácia (REQM – Raíz do Erro Quadrático Médio) para cada componente do SGL foi calculada a partir das seguintes equações (MONICO et al., 2009):

$$REQM_X = \sqrt{\Delta X^2 + \sigma_{x_{rastreio}}^2 + \sigma_{x_{PILAR}}^2}, \quad (40)$$

$$REQM_Y = \sqrt{\Delta Y^2 + \sigma_{y_{rastreio}}^2 + \sigma_{y_{PILAR}}^2}, \quad (41)$$

$$REQM_Z = \sqrt{\Delta Z^2 + \sigma_{z_{rastreio}}^2 + \sigma_{z_{PILAR}}^2}, \quad (42)$$

onde,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$  são as discrepâncias entre o valor obtido e o valor de referência em X, Y e Z, respectivamente;  $\sigma_{x_{rastreio}}$ ,  $\sigma_{y_{rastreio}}$  e  $\sigma_{z_{rastreio}}$  são os desvios-padrão em X, Y e Z, respectivamente, obtidos com o processamento; e  $\sigma_{x_{PILAR}}^2$ ,  $\sigma_{y_{PILAR}}^2$  e  $\sigma_{z_{PILAR}}^2$  são os desvios-padrão das coordenadas do Pilar 1000, respectivamente.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados provenientes das etapas apresentadas no capítulo 3.

### 4.1 RESULTADOS OBTIDOS NO CÁLCULO E PROPAGAÇÃO DOS VALORES DE DCB DO RECEPTOR GPS

Segundo mencionado anteriormente, o cálculo dos valores de DCB do receptor Leica 1200 foi realizado a partir da metodologia da Simples Diferença das observáveis livre de geometria, com rastreios de aproximadamente 24 horas, utilizando as pseudodistâncias filtradas pela fase. Os valores de DCB do receptor GPS Leica 1200 obtidos para os 19 experimentos são apresentados na Tabela 5.

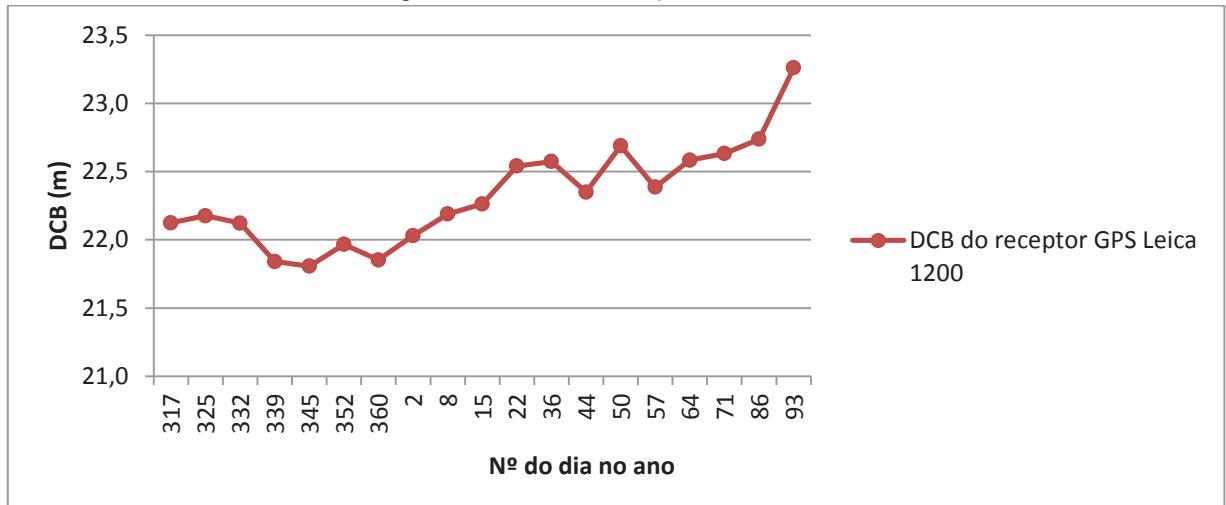
Tabela 5: Valores do DCB do receptor GPS Leica 1200.

<b>Nº DO DIA NO ANO</b>	<b>VALOR (m)</b>	<b>VALOR (ns)</b>	<b>Nº DO DIA NO ANO</b>	<b>VALOR (m)</b>	<b>VALOR (ns)</b>
<b>317/2017</b>	22,1243	7,38E-08			
<b>325/2017</b>	22,1760	7,40E-08	<b>22/2018</b>	22,5411	7,52E-08
<b>332/2017</b>	22,1219	7,38E-08	<b>36/2018</b>	22,5739	7,53E-08
<b>339/2017</b>	21,8412	7,29E-08	<b>44/2018</b>	22,3496	7,46E-08
<b>345/2017</b>	21,8074	7,27E-08	<b>50/2018</b>	22,6879	7,57E-08
<b>352/2017</b>	21,9665	7,33E-08	<b>57/2018</b>	22,3855	7,47E-08
<b>360/2017</b>	21,8531	7,29E-08	<b>64/2018</b>	22,5838	7,53E-08
<b>2/2018</b>	22,0313	7,35E-08	<b>71/2018</b>	22,6320	7,55E-08
<b>8/2018</b>	22,1893	7,40E-08	<b>86/2018</b>	22,7377	7,58E-08
<b>15/2018</b>	22,2632	7,43E-08	<b>93/2018</b>	23,2600	7,76E-08

Fonte: A autora (2019).

Conforme pode ser observado na Tabela 5, os valores apresentaram um desvio padrão de 0,3639 m. Na Figura 11 visualiza-se o comportamento do DCB do receptor GPS Leica 1200 para o período analisado.

Figura 11: DCB do receptor Leica 1200.



Fonte: A autora (2019).

Como já indicado no item 3.4, com a finalidade de validar a ideia de propagação de valores de DCB, testes foram realizados utilizando os 31 dias de dados do mês de agosto de 2017 da estação UFPR. Uma vez que os valores de DCB para o receptor que operava nesta estação são calculados pelo IGS e disponibilizados nos arquivos IONEX, os valores de DCB propagados a partir do primeiro dia foram comparados com os demais e suas diferenças foram calculadas (Tabela 6). No dia 25 não houve registro.

Tabela 6: Diferenças entre DCB do receptor da estação UFPR propagado e calculado.

DCB UFPR AGOSTO 2017				
DIA	VALOR IGS (ns)	VALOR PROPAGADO (ns)	DIFERENÇA (ns)	DIFERENÇA (m)
1	35,176	ñ	-	-
2	35,334	35,334	0	0
3	35,424	35,492	0,068	0,020
4	35,328	35,492	0,164	0,049
5	35,360	35,334	-0,026	-0,008
6	35,335	35,176	-0,159	-0,048
7	35,221	35,176	-0,045	-0,013
8	35,173	35,334	0,161	0,048
9	35,524	35,492	-0,032	-0,010
10	35,294	35,492	0,198	0,059
11	35,112	35,334	0,222	0,067
12	35,315	35,176	-0,139	-0,042
13	35,571	35,176	-0,395	-0,118

(Continua)

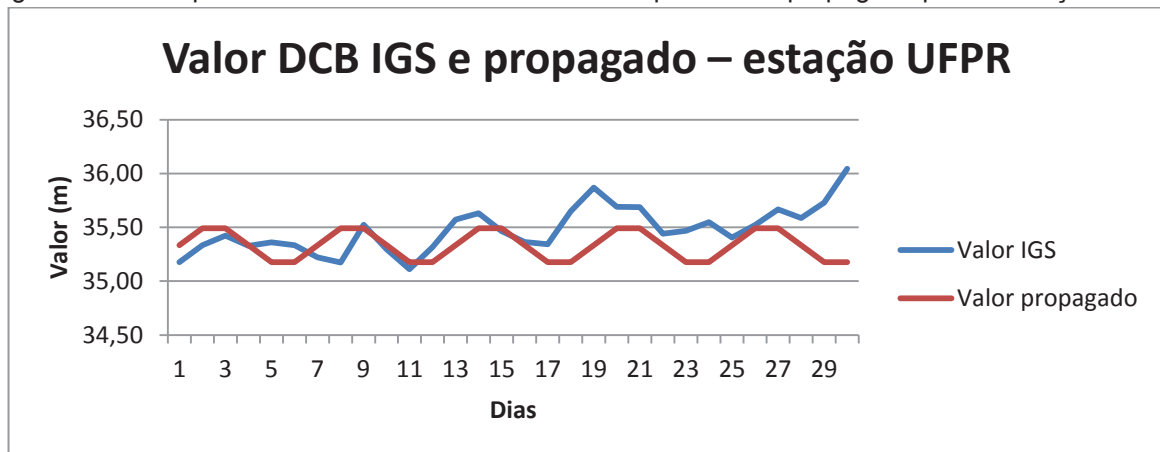
Tabela 6: Diferenças entre DCB do receptor da estação UFPR propagado e calculado.  
(Continuação)

<b>DIA</b>	<b>VALOR IGS (ns)</b>	<b>VALOR PROPAGADO (ns)</b>	<b>DIFERENÇA (ns)</b>	<b>DIFERENÇA (m)</b>
14	35,630	35,334	-0,296	-0,089
15	35,464	35,492	0,028	0,008
16	35,364	35,492	0,128	0,038
17	35,342	35,334	-0,008	-0,002
18	35,649	35,176	-0,473	-0,142
19	35,868	35,176	-0,692	-0,207
20	35,690	35,334	-0,356	-0,107
21	35,688	35,492	-0,196	-0,059
22	35,441	35,492	0,051	0,015
23	35,467	35,334	-0,133	-0,040
24	35,548	35,176	-0,372	-0,112
25	-	35,176	-	-
26	35,404	35,334	-0,070	-0,021
27	35,521	35,492	-0,029	-0,009
28	35,668	35,492	-0,176	-0,053
29	35,588	35,334	-0,254	-0,076
30	35,729	35,176	-0,553	-0,166
31	36,043	35,176	-0,867	-0,260

Fonte: A autora (2019).

Conforme pode ser visto na Tabela 6, os resultados revelam uma discrepância máxima de 0,867 ns, que representa 0,260 m, entre o valor determinado pelo IGS e o valor propagado por integração numérica. Este valor é considerado aceitável, visto que é compatível com a acurácia com que os valores de TEC são estimados pelo IGS, que é de 2 à 8 TECU (IGS, 2018). Como já mencionado no item 2.3, 1 TECU induz a um erro de cerca de 0,16 m e 0,27 m nas observáveis das portadoras L1 e L2, respectivamente. Na figura 12 é possível ver a discrepância entre os valores do IGS e os propagados.

Figura 12: Discrepância entre o valor do DCB calculado pelo IGS e propagado para a estação UFPR.



Fonte: A autora (2019).

Ainda na etapa de validação da propagação, com os dados da estação UFPR foram realizados processamentos PPP modo estático na plataforma online do IBGE (IBGE-PPP), com correção de ordem superior da refração ionosférica, utilizando o TEC calculado com os DCBs propagados. No cálculo, foram utilizadas como referência as coordenadas obtidas com um PPP onde se utilizou os dados brutos da estação UFPR obtidos no site do IBGE. Os valores de REQM foram calculados e as diferenças na acurácia estão indicadas na Tabela 7.

Tabela 7: Diferenças entre as coordenadas da RBMC-UFPR calculadas e de referência.

DIA	PPP					
	$\Delta$ LAT (cm)	REQM LAT (cm)	$\Delta$ LONG (cm)	REQM LONG (cm)	$\Delta$ ALT (cm)	REQM ALT (cm)
1	-	-	-	-	-	-
2	0,154	0,184	1,328	1,342	2,700	2,717
3	0,154	0,184	0,710	0,738	1,700	1,726
4	0,154	0,184	1,328	1,342	1,700	1,726
5	0,154	0,184	0,710	0,738	2,700	2,717
6	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,726
7	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,726
8	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,726
9	0,154	0,184	1,019	1,038	1,700	1,726
10	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,726
11	0,463	0,474	1,328	1,342	0,700	0,806
12	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,726
13	0,154	0,184	1,636	1,649	0,700	0,762
14	0,154	0,184	1,944	1,955	0,700	0,762

(Continua)

Tabela 7: Diferenças entre as coordenadas da RBMC-UFPR calculadas e de referência.

(Continuação)

DIA	$\Delta$ LAT (cm)	REQM LAT (cm)	$\Delta$ LONG (cm)	REQM LONG (cm)	$\Delta$ ALT (cm)	REQM ALT (cm)
15	0,154	0,184	1,328	1,342	0,700	0,762
16	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,726
17	0,154	0,184	1,328	1,342	1,700	1,746
18	0,154	0,184	1,328	1,342	1,700	1,726
19	0,463	0,474	1,328	1,342	0,700	0,762
20	0,154	0,184	1,636	1,649	1,700	1,746
21	0,463	0,474	1,328	1,342	2,700	2,717
22	0,463	0,474	1,636	1,649	1,700	1,726
23	0,154	0,184	1,328	1,342	1,700	1,746
24	0,463	0,474	1,328	1,342	1,700	1,726
25	0,463	0,474	1,018	1,038	1,700	1,746
26	0,463	0,474	1,328	1,342	0,700	0,762
27	0,154	0,184	1,328	1,342	1,700	1,726
28	0,154	0,184	1,328	1,342	0,700	0,806
29	0,154	0,184	1,328	1,342	0,700	0,762
30	0,154	0,184	1,636	1,649	0,700	0,806
31	0,154	0,184	1,328	1,342	1,700	1,726
<b>Média</b>	0,226	0,252	1,389	1,404	1,500	1,543

Fonte: A autora (2019).

Os valores em vermelho na Tabela 7 representam as maiores discrepâncias em latitude, longitude e altura, juntamente com os respectivos REQMs. As discrepâncias em latitude são na ordem do milímetro e em longitude e altura são na ordem do centímetro. A máxima discrepância em latitude é de 0,463 cm, em longitude é de 1,944 cm e em altura é de 2,7 cm. O valor médio do REQM para latitude, longitude e altura, respectivamente, são 0,252 cm, 1,404 cm e 1,543 cm. Os resultados não apresentaram nenhum padrão, possivelmente pelo comportamento não linear da variação nos DCBs. A componente com menor acurácia foi a altimétrica, a qual apresentou maior valor de REQM.

#### 4.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS COM DURAÇÃO DE UMA HORA NO PILAR 1000

Após as etapas de estimativa dos valores de DCB, de TEC e das correções dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica nas observáveis, realizaram-se os experimentos do Quadro 1. Conforme exposto, os quatro experimentos foram

realizados com processamentos PPP modo estático no software RTKLIB, com uma e duas horas de rastreo. Posteriormente aos processamentos com duração de uma hora, os valores de REQM para as componentes do SGL foram calculados com base nos desvios-padrão e nos deslocamentos em relação às coordenadas de referência do Pilar 1000. Após a correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica, as pseudodistâncias entre os rinex corrigidos e não corrigidos apresentaram uma diferença na ordem do centímetro.

Na Tabela 8 são apresentados os valores de discrepâncias ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ ) e de REQM obtidos com o processamento de uma hora para os casos de correção de primeira ordem (azul) e correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica (vermelho). As médias dos REQM para os casos da Tabela 8 estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 8: Discrepâncias e REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de uma hora.

Nº DO DIA NO ANO	1 HORA					
	$\Delta X$ (m)	REQM X (m)	$\Delta Y$ (m)	REQM Y (m)	$\Delta Z$ (m)	REQM Z (m)
317/2017	0,2400	0,2472	0,2067	0,2263	0,0875	0,1427
	0,2391	0,2464	0,20470	0,2245	0,0887	0,1434
325/2017	0,7803	0,7825	0,1701	0,1931	0,0961	0,1395
	0,7800	0,7822	0,1680	0,1912	0,0952	0,1389
332/2017	0,4890	0,4924	0,5128	0,5197	0,4340	0,4435
	0,4888	0,4921	0,5112	0,5182	0,4328	0,4423
339/2017	0,5713	0,5742	0,3038	0,3133	0,3114	0,3345
	0,5703	0,5733	0,3035	0,3130	0,3104	0,3336
345/2017	0,5652	0,5678	0,3258	0,3337	0,29350	0,3213
	0,5623	0,5650	0,3271	0,3350	0,2911	0,3191
352/2017	0,9326	0,9341	0,3031	0,3120	0,3340	0,3547
	0,9298	0,9313	0,3026	0,3115	0,3300	0,3510
360/2017	1,0127	1,0141	0,3386	0,3472	0,6119	0,6202
	1,0095	1,0109	0,3378	0,3464	0,6101	0,6184
2/2018	0,6576	0,6597	0,3459	0,3545	0,6293	0,6368
	0,6565	0,6586	0,3446	0,3532	0,6293	0,6368
8/2018	0,6589	0,6610	0,4051	0,4125	0,4976	0,5055
	0,6581	0,6601	0,4035	0,4109	0,4967	0,5046
15/2018	0,7997	0,8012	0,4669	0,4721	0,6796	0,6862
	0,7992	0,8008	0,4666	0,4719	0,6792	0,6858
22/2018	0,8308	0,8323	0,3411	0,3477	0,4950	0,5061
	0,8308	0,8323	0,3409	0,3475	0,4943	0,5054

(Continua)

Tabela 8: Discrepâncias e REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de uma hora.  
(Continuação)

Nº DO DIA NO ANO	$\Delta X$ (m)	REQM X (m)	$\Delta Y$ (m)	REQM Y (m)	$\Delta Z$ (m)	REQM Z (m)
36/2018	0,4906	0,4946	0,4422	0,4495	0,3165	0,3336
	0,4882	0,4922	0,4407	0,4481	0,3155	0,3327
44/2018	1,0742	1,0760	0,2652	0,2808	0,2683	0,2872
	1,0706	1,0724	0,2641	0,2797	0,2671	0,2861
50/2018	1,1400	1,1415	0,3345	0,3475	0,3912	0,4036
	1,1396	1,1411	0,3337	0,3467	0,3899	0,4023
57/2018	0,4849	0,4881	0,3567	0,3697	0,1980	0,2254
	0,4824	0,4856	0,3571	0,3700	0,1977	0,2251
64/2018	0,6163	0,6189	0,3172	0,3314	0,2649	0,2932
	0,6142	0,6167	0,3179	0,3322	0,2637	0,2921
71/2018	0,5935	0,5961	0,3547	0,3650	0,5929	0,6055
	0,5926	0,5951	0,3550	0,3653	0,5892	0,6019
86/2018	0,6939	0,6956	0,1380	0,1541	0,6284	0,6327
	0,6946	0,6963	0,1367	0,1529	0,6268	0,6311
93/2018	0,5365	0,5398	0,4143	0,4249	0,3874	0,4008
	0,5331	0,5364	0,4138	0,4244	0,3864	0,3999

Fonte: A autora (2019).

Para os experimentos 1 e 2 realizados com PPP de 1 hora, a média do desvio-padrão para a componente X foi de 0,0556 m, para a componente Y foi de 0,0827 m e para a componente Z foi de 0,1055 m. Como os valores dos desvios-padrão são menores que os valores de  $\Delta$ , então os erros aleatórios são menores que os sistemáticos. Com a melhoria nos  $\Delta$ , houve melhoria no tratamento dos erros sistemáticos dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica.

Tabela 9: Média dos REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de uma hora.

	MÉDIAS DOS REQM (m)		
	X	Y	Z
Experimento 1	0,6956	0,3450	0,4144
Experimento 2	0,6942	0,3444	0,4132

Fonte: A autora (2019).

Ao analisar a Tabela 9, nota-se que a diferença das médias dos REQM entre os casos ficou na ordem do milímetro para as três componentes. A acurácia para o experimento com correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica se mostrou melhor nas três componentes do que com correção apenas dos efeitos de

primeira ordem. A componente com menor acurácia no caso dos experimentos 1 e 2 foi a componente X, a qual obteve o maior valor de REQM dentre as outras.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de discrepâncias e REQM levando em conta a correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica, utilizando os valores de DCB propagados para três (rosa) e quatro (roxo) semanas. Cabe lembrar que os experimentos com propagação foram realizados a partir da primeira semana, com intervalos de quatro semanas. As médias dos REQM para os casos da Tabela 10 estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 10: Discrepâncias e REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de uma hora.

Nº DO DIA NO ANO	$\Delta X$ (m)	REQM X (m)	$\Delta Y$ (m)	REQM Y (m)	$\Delta Z$ (m)	REQM Z (m)
339/2017	-0,5703	0,5733	0,3035	0,3130	-0,3104	0,3336
345/2017	-0,5623	0,5649	0,3271	0,3350	-0,2911	0,3191
2/2018	-0,6565	0,6586	0,3446	0,3532	-0,6293	0,6368
8/2018	-0,6581	0,6601	0,4035	0,4109	-0,4967	0,5046
36/2018	-0,4882	0,4922	0,4407	0,4481	-0,3155	0,3327
57/2018	-0,4824	0,4856	0,3571	0,3700	-0,1977	0,2251
64/2018	-0,6142	0,6167	0,3179	0,3322	-0,2637	0,2921
86/2018	-0,6946	0,6963	0,1367	0,1529	-0,6268	0,6311
93/2018	-0,5331	0,5364	0,4138	0,4244	-0,3864	0,3999

Fonte: A autora (2019).

Para os experimentos 3 e 4 realizados com PPP de 1 hora, a média do desvio-padrão para a componente X foi de 0,0556 m, para a componente Y foi de 0,0823 m e para a componente Z foi de 0,1060 m. Visto que os valores dos desvios-padrão são menores que os valores de  $\Delta$ , logo os erros aleatórios são menores que os sistemáticos, portanto houve melhoria no tratamento dos erros sistemáticos dos efeitos de ordem superior da ionosfera.

Tabela 11: Média dos REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de uma hora.

MÉDIAS DOS REQM (m) - EXPERIMENTOS 3 E 4			
	X	Y	Z
3ª semana	0,6035	0,2973	0,4567
4ª semana	0,5741	0,3901	0,3697

Fonte: A autora (2019).

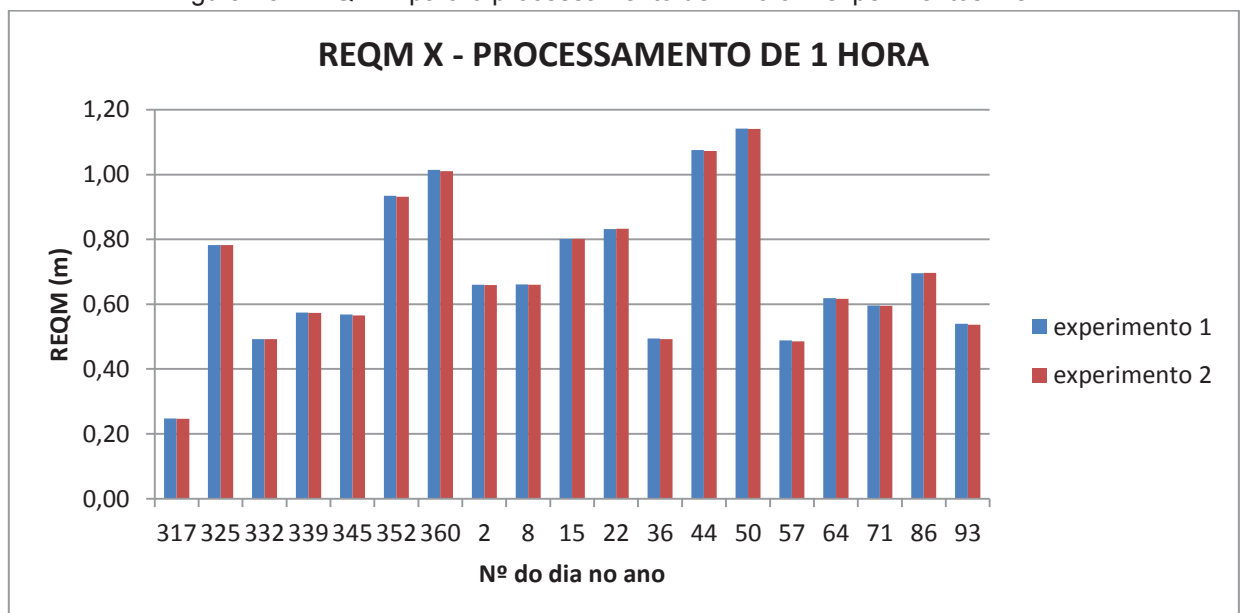
Verifica-se na Tabela 10, que os valores são muito próximos às semanas coincidentes na Tabela 8. Isso se deve ao fato de que a propagação ficou tão

próxima quanto se esperava, sendo assim, o objetivo da propagação foi alcançado. Ao analisar a Tabela 11, percebe-se que a diferença das médias dos REQM entre os experimentos 3 e 4 ficou na ordem do centímetro para as três componentes. Embora na acurácia da componente Y houve uma piora, nas componentes X e Z houve uma melhora para o caso do experimento 4. Isso se deve possivelmente ao comportamento não linear dos DCBs. A componente com menor acurácia é a X em ambos os experimentos. Caso fosse necessário, seria possível utilizar os resultados com os valores de DCBs propagados.

As Figuras 13, 15 e 17 representam as variações dos REQM das componentes X, Y e Z, respectivamente, e nas Figuras 14, 16 e 18 encontram-se as diferenças entre os REQM das componentes X, Y e Z, respectivamente, para os experimentos 1 e 2 do Quadro 1, com processamento de uma hora. Percebe-se que a componente X tem maiores valores de REQM do que Y e Z, conforme já visto anteriormente.

Já na Figura 19, estão descritos os valores de REQM para X, Y, Z em relação aos experimentos 3 e 4 do Quadro 1, com processamento de uma hora.

Figura 13: REQM X para o processamento de 1 hora – experimentos 1 e 2.

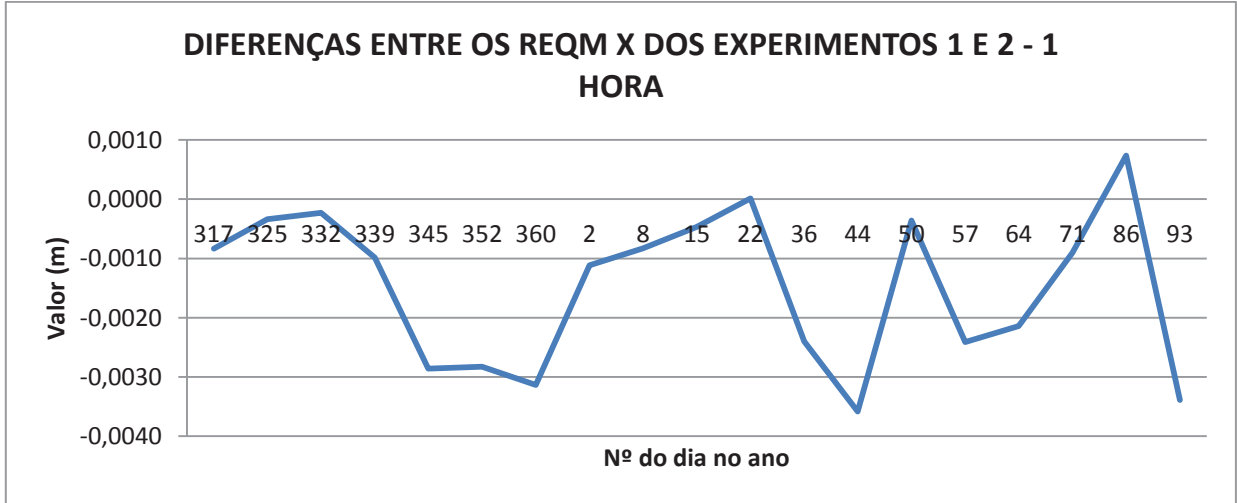


Fonte: A autora (2019).

Nota-se na Figura 13 que o maior valor de REQM é maior que 1,1 m no dia 50 e o menor valor é de aproximadamente 0,2 m no dia 317. Em geral, percebe-se

que os valores do experimento 2 são menores que do experimento 1, ou seja, são mais acurados.

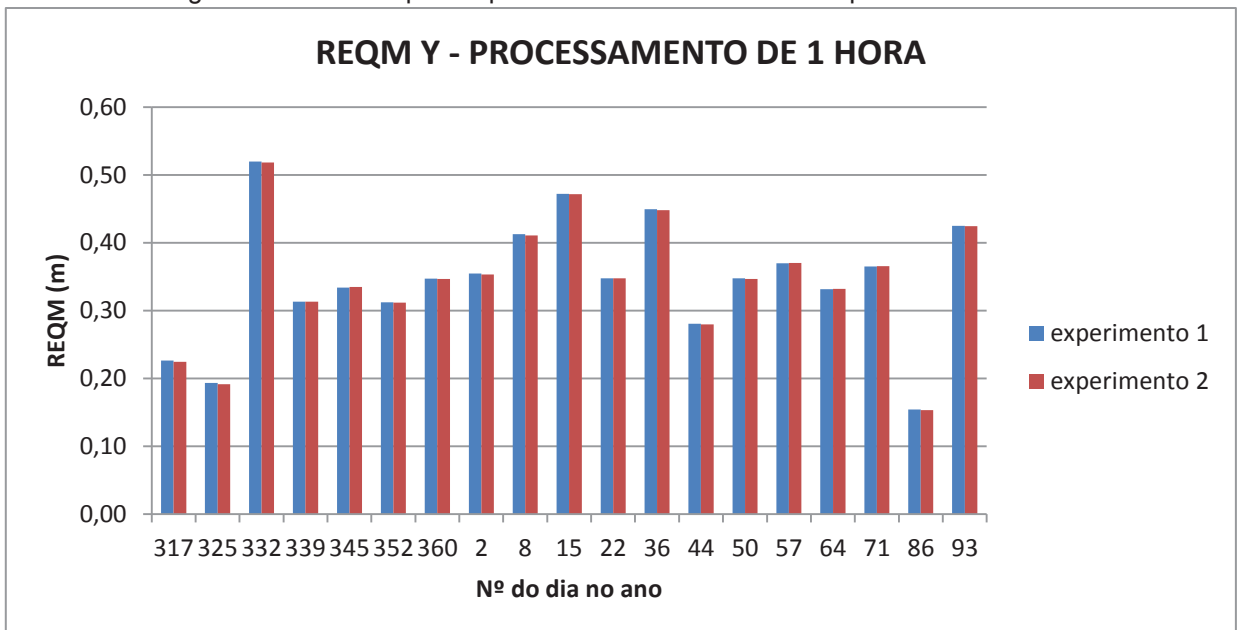
Figura 14: Diferenças entre os REQM X dos experimentos 1 e 2 para o processamento de 1 hora.



Fonte: A autora (2019).

Na Figura 14 observa-se que a maior diferença entre os REQM da componente X é de 0,0036 m no dia 44 e a menor é de aproximadamente zero no dia 22.

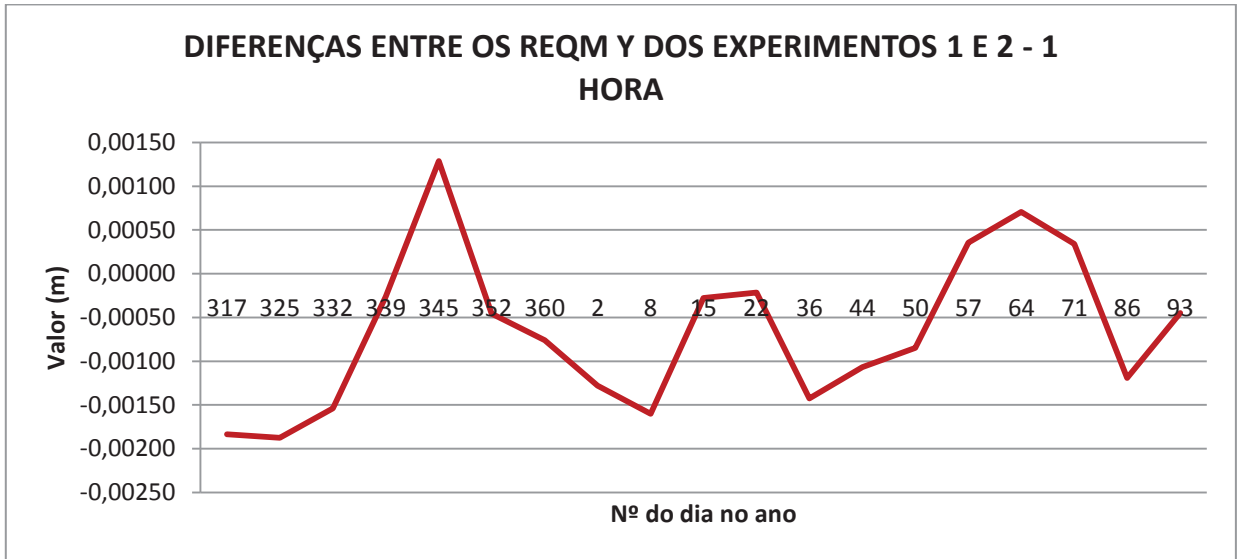
Figura 15: REQM Y para o processamento de 1 hora – experimentos 1 e 2.



Fonte: A autora (2019).

Observa-se na Figura 15 que no dia 332 obteve-se o maior valor de REQM, sendo de aproximadamente 0,5 m. O menor valor foi registrado no dia 86, sendo de aproximadamente 0,2 m. Os resultados do experimento 2 são mais acurados do que do experimento 1.

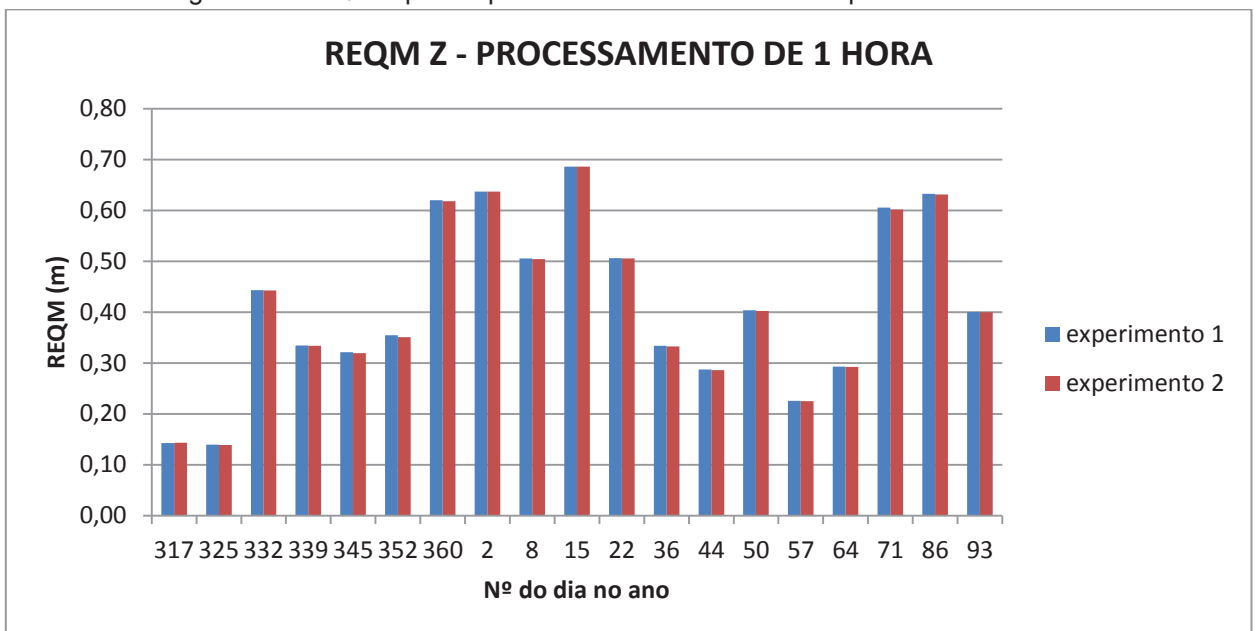
Figura 16: Diferenças entre os REQM Y dos experimentos 1 e 2 para o processamento de 1 hora.



Fonte: A autora (2019).

Na Figura 16 observa-se que a maior diferença entre os REQM da componente Y é de 0,0019 m no dia 325 e a menor é de 0,0003 m no dia 71.

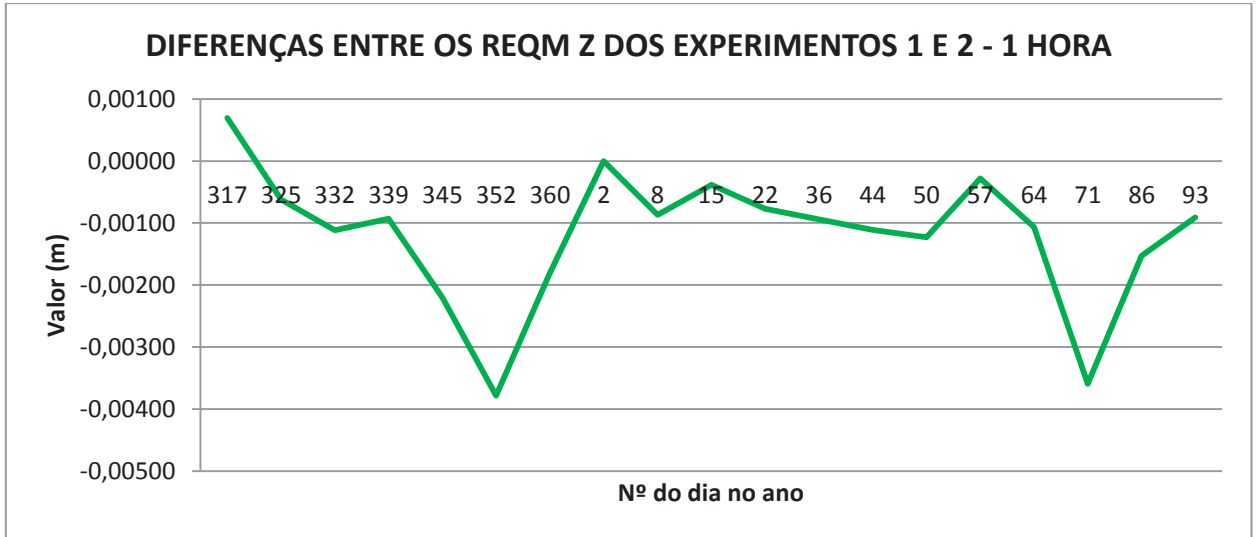
Figura 17: REQM Z para o processamento de 1 hora – experimentos 1 e 2.



Fonte: A autora (2019).

Constata-se observando a Figura 17 que o maior valor de REQM é de aproximadamente 0,7 m no dia 15, sendo que o menor valor é de aproximadamente 0,1 encontrado no dia 325. Nota-se também que os resultados do experimento 1 são menos acurados do que os do experimento 2, pois aqueles apresentam valores maiores do que estes.

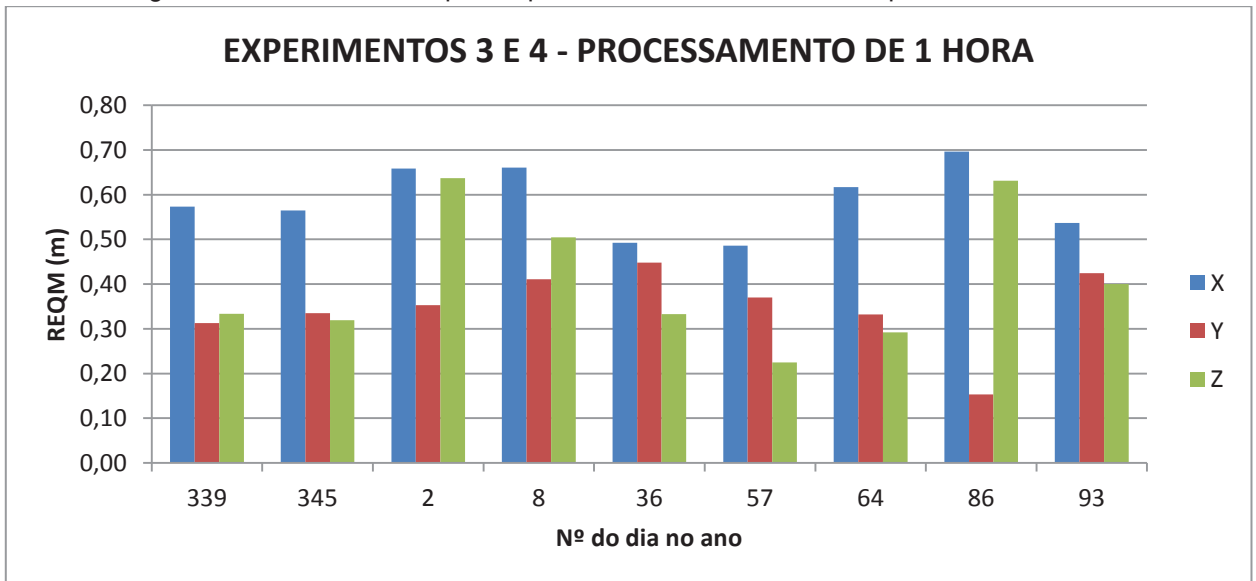
Figura 18: Diferenças entre os REQM Z dos experimentos 1 e 2 para o processamento de 1 hora.



Fonte: A autora (2019).

Nota-se na Figura 18 que a maior diferença entre os REQM da componente Z é de 0,0378 m no dia 352 e a menor é de aproximadamente zero no dia 2.

Figura 19: REQM X, Y e Z para o processamento de 1 hora – experimentos 3 e 4.



Fonte: A autora (2019).

Observa-se na Figura 19 que os valores de REQM de X são maiores do que Y e Z, da mesma forma como observado nas Figuras 13, 15 e 17. O maior valor de REQM na componente X é do dia 86, sendo de 0,6963 m e o menor é do dia 57, sendo de 0,4856 m. Já para Y, o maior valor é do dia 36, sendo de 0,4481 m e o menor é do dia 86, sendo de 0,1529 m. Para a componente Z, o maior valor é no dia 2, sendo de 0,6368 m e o menor valor é no dia 57, sendo de 0,2251 m.

#### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS COM DURAÇÃO DE DUAS HORAS NO PILAR 1000

Posteriormente aos processamentos com duração de duas horas, os valores de REQM para as componentes do SGL foram calculados com base nos desvios-padrão e nos deslocamentos em relação às coordenadas de referência do Pilar 1000.

Os valores de discrepâncias ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  e  $\Delta Z$ ) e os REQM obtidos com o processamento de duas horas para os casos de correção de primeira ordem (azul) e correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica (vermelho), são apresentados nas Tabelas 12. As médias dos REQM para os casos da Tabela 12 estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 12: Discrepâncias e REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de duas horas.

2 HORAS						
Nº DO DIA NO ANO	$\Delta X$ (m)	REQM X (m)	$\Delta Y$ (m)	REQM Y (m)	$\Delta Z$ (m)	REQM Z (m)
317/2017	0,3359	0,3369	0,3605	0,3651	0,0973	0,1059
	0,3366	0,3376	0,3610	0,3656	0,0949	0,1037
325/2017	0,6929	0,6934	0,3100	0,3140	0,4082	0,4111
	0,6938	0,6943	0,3111	0,3151	0,4062	0,4091
332/2017	0,5794	0,5799	0,3721	0,3747	0,3452	0,3495
	0,5792	0,5798	0,3738	0,3764	0,3439	0,3482
339/2017	0,6578	0,6582	0,2968	0,2996	0,3121	0,3171
	0,6577	0,6581	0,2986	0,3014	0,3113	0,3163
345/2017	0,5920	0,5925	0,3013	0,3040	0,2859	0,2915
	0,5912	0,5917	0,3036	0,3063	0,2848	0,2904
352/2017	0,8650	0,8654	0,2198	0,2243	0,3670	0,3708
	0,8633	0,8637	0,2204	0,2249	0,3645	0,3684
360/2017	0,7688	0,7692	0,3200	0,3230	0,5628	0,5643
	0,7679	0,7682	0,3211	0,3240	0,5619	0,5634

(Continua)

Tabela 12: Discrepâncias e REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de duas horas.  
(Continuação)

Nº DO DIA NO ANO	$\Delta X$ (m)	REQM X (m)	$\Delta Y$ (m)	REQM Y (m)	$\Delta Z$ (m)	REQM Z (m)
2/2018	0,5939	0,5943	0,3569	0,3593	0,5361	0,5377
	0,5943	0,5948	0,3584	0,3609	0,5351	0,5367
8/2018	0,5730	0,5735	0,3192	0,3224	-0,3767	0,3790
	0,5742	0,5746	0,3213	0,3244	-0,3758	0,3781
15/2018	0,8273	0,8275	0,3342	0,3364	-0,5880	0,5898
	0,8277	0,8280	0,3366	0,3387	-0,5874	0,5892
22/2018	0,7842	0,7845	0,3292	0,3317	-0,4637	0,4666
	0,7845	0,7848	0,3311	0,3335	-0,4624	0,4653
36/2018	0,5748	0,5755	0,3067	0,3120	-0,0794	0,0909
	0,5739	0,5745	0,3082	0,3135	-0,0787	0,0903
44/2018	0,9388	0,9392	0,2116	0,2209	-0,2413	0,2461
	0,9360	0,9364	0,2136	0,2228	-0,2415	0,2462
50/2018	0,9523	0,9526	0,2788	0,2858	-0,3882	0,3919
	0,9521	0,9525	0,2810	0,2879	-0,3876	0,3913
57/2018	0,6099	0,6104	0,3122	0,3175	-0,2812	0,2870
	0,6090	0,6094	0,3145	0,3197	-0,2810	0,2867
64/2018	0,4689	0,4695	0,3131	0,3172	-0,3503	0,3543
	0,4681	0,4687	0,3155	0,3196	-0,3496	0,3536
71/2018	0,4128	0,4134	0,3402	0,3437	-0,4138	0,4160
	0,4133	0,4140	0,3419	0,3453	-0,4119	0,4142
86/2018	0,7404	0,7407	0,2259	0,2298	-0,5965	0,5974
	0,7416	0,7419	0,2263	0,2302	-0,5958	0,5967
93/2018	0,4714	0,4721	0,2965	0,3025	-0,2045	0,2104
	0,4700	0,4707	0,2986	0,3045	-0,2042	0,2101

Fonte: A autora (2019).

Para os experimentos 1 e 2 realizados com PPP de 2 horas, a média do desvio-padrão da componente X foi de 0,0245 m, para a componente Y foi de 0,0489 m e para a componente Z foi de 0,0481 m. Como os valores dos desvios-padrão são menores que os valores de  $\Delta$ , então os erros aleatórios são menores que os sistemáticos. Com a melhoria nos  $\Delta$ , houve melhoria no tratamento dos erros sistemáticos dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica.

Tabela 13: Média dos REQM para os experimentos 1 e 2, com processamento de duas horas.

	MÉDIAS DOS REQM (m)		
	X	Y	Z
<b>Experimento 1</b>	0,6552	0,3097	0,3672
<b>Experimento 2</b>	0,6549	0,3113	0,3662

Fonte: A autora (2019).

Percebe-se ao analisar a Tabela 13 que a diferença das médias dos REQM entre os casos ficou na ordem do milímetro para as três componentes. A acurácia para o experimento com correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica se mostrou mais acurado do que com correção apenas dos efeitos de primeira ordem. Apesar da componente com menor acurácia ainda ser a X para ambos os experimentos, percebe-se que o processamento de duas horas se mostrou com melhor acurácia do que de apenas uma hora, pois os REQM das componentes X, Y e Z ficaram mais próximos de zero.

Os valores de discrepâncias e REQM levando em conta a correção dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica, utilizando os valores de DCB propagados para três (rosa) e quatro (roxo) semanas são apresentados na Tabela 14. Na Tabela 15 estão apresentados os valores das médias dos REQM para os experimentos 3 e 4 com processamento de duas horas.

Tabela 14: Discrepâncias e REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de duas horas.

Nº DO DIA NO ANO	$\Delta X$ (m)	REQM X (m)	$\Delta Y$ (m)	REQM Y (m)	$\Delta Z$ (m)	REQM Z (m)
339/2017	-0,6577	0,6581	0,2986	0,3014	-0,3113	0,3163
345/2017	-0,5912	0,5917	0,3036	0,3063	-0,2848	0,2904
2/2018	-0,5943	0,5948	0,3584	0,3609	-0,5351	0,5367
8/2018	-0,5742	0,5746	0,3213	0,3244	-0,3758	0,3781
36/2018	-0,5739	0,5745	0,3082	0,3135	-0,0787	0,0903
57/2018	-0,6090	0,6094	0,3145	0,3197	-0,2810	0,2867
64/2018	-0,4681	0,4687	0,3155	0,3196	-0,3496	0,3536
86/2018	-0,7416	0,7419	0,2263	0,2302	-0,5958	0,5967
93/2018	-0,4700	0,4707	0,2986	0,3045	-0,2042	0,2101

Fonte: A autora (2019).

Para os experimentos 3 e 4 realizados com PPP de 2 horas, a média do desvio-padrão da componente X foi de 0,0240 m, para a componente Y foi de 0,0485 m e para a componente Z foi de 0,0480 m. Visto que os valores dos desvios-padrão são menores que os valores de  $\Delta$ , logo os erros aleatórios são menores que os sistemáticos, portanto houve melhoria no tratamento dos erros sistemáticos dos efeitos de ordem superior da ionosfera.

Tabela 15: Média dos REQM para os experimentos 3 e 4, com processamento de duas horas.

<b>MÉDIAS DOS REQM (m) - EXPERIMENTOS 3 E 4</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>3ª semana</b>	0,6511	0,3031	0,4341
<b>4ª semana</b>	0,5360	0,3137	0,2645

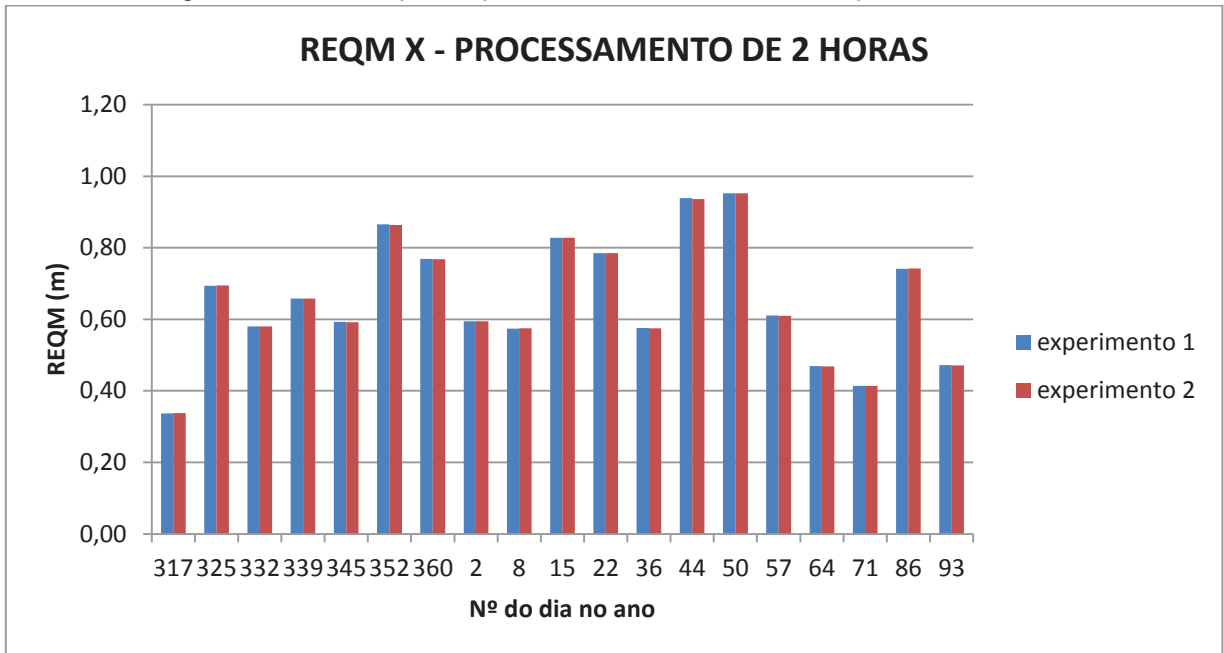
Fonte: A autora (2019).

Verifica-se na Tabela 14, que a diferença entre os valores propagados e os mesmos valores quando utilizado o DCB calculado é aproximadamente zero, confirmando que o objetivo da propagação numérica foi alcançado também para o caso de duas horas de rastreo. Observa-se na Tabela 15 que a diferença das médias dos REQM entre os experimentos 3 e 4 ficou na ordem do decímetro para a componente X e Z e na ordem do centímetro para a componente Y. Enquanto na componente Y a acurácia piorou, nas componentes X e Z houve uma melhora para o caso do experimento 4. Isso se deve possivelmente ao comportamento não linear dos DCBs. A componente com menor acurácia é a X em ambos os experimentos. Além do mais, as médias dos REQM obtidas com os processamentos de duas horas ficaram, no geral, melhores do que aquelas obtidas com os processamentos de uma hora.

As Figuras 20, 22 e 24 representam as variações dos REQM das componentes X, Y e Z, respectivamente, e nas Figuras 21, 23 e 25 encontram-se as diferenças entre os REQM das componentes X, Y e Z, respectivamente, para os experimentos 1 e 2 do Quadro 1, com processamento de duas horas. Percebe-se que a componente X tem maiores valores de REQM do que Y e Z, conforme já visto anteriormente.

Já na Figura 26, estão descritos os valores de REQM para X, Y, Z em relação aos experimentos 3 e 4 do Quadro 1, com processamento de duas horas.

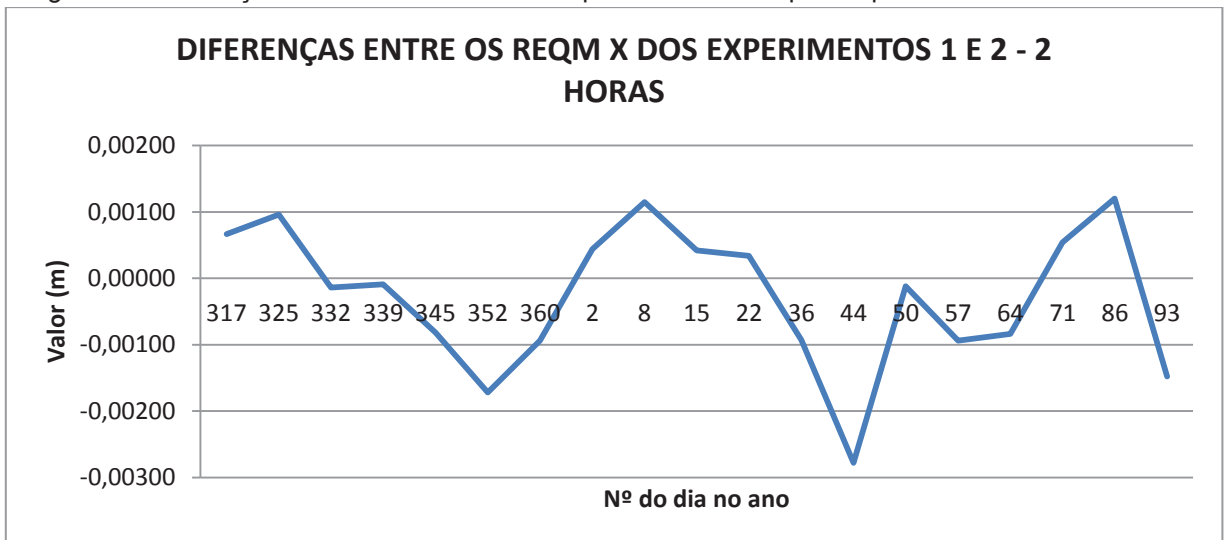
Figura 20: REQM X para o processamento de 2 horas – experimentos 1 e 2.



Fonte: A autora (2019).

Observa-se na Figura 20 que o maior valor de REQM é de aproximadamente 0,9 m no dia 50, sendo que o menor valor é de aproximadamente 0,3 m encontrado no dia 317.

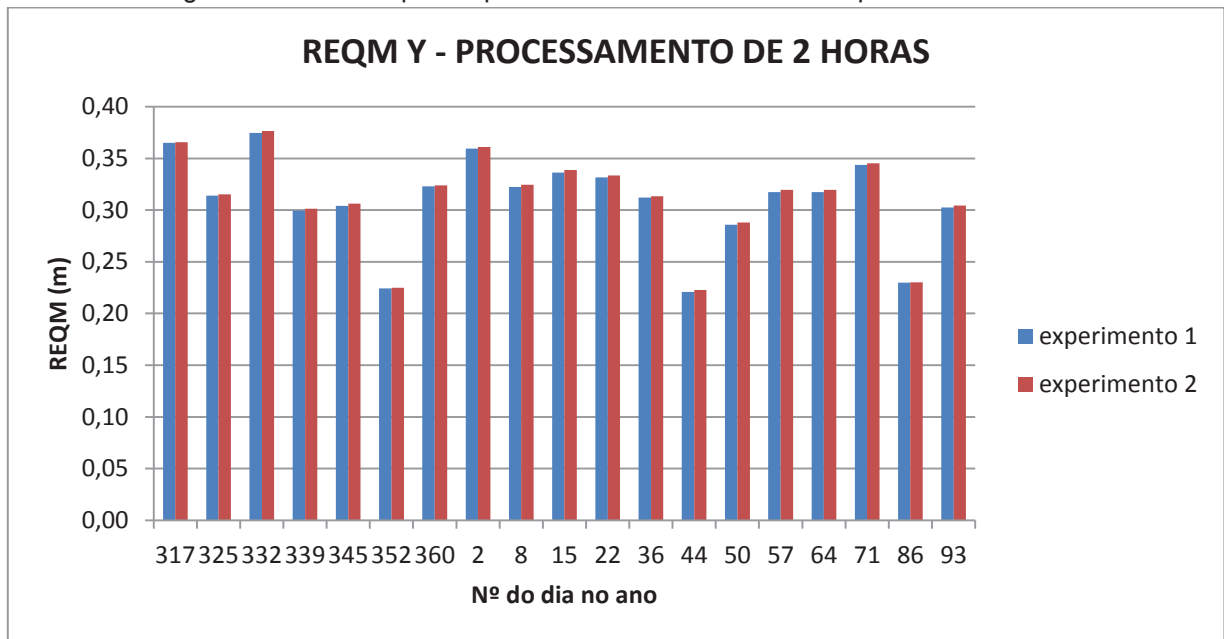
Figura 21: Diferenças entre os REQM X dos experimentos 1 e 2 para o processamento de 2 horas.



Fonte: A autora (2019).

Nota-se na Figura 21 que a maior diferença entre os REQM da componente X é de 0,0028 m no dia 44 e a menor é de aproximadamente zero nos dias 339 e 50.

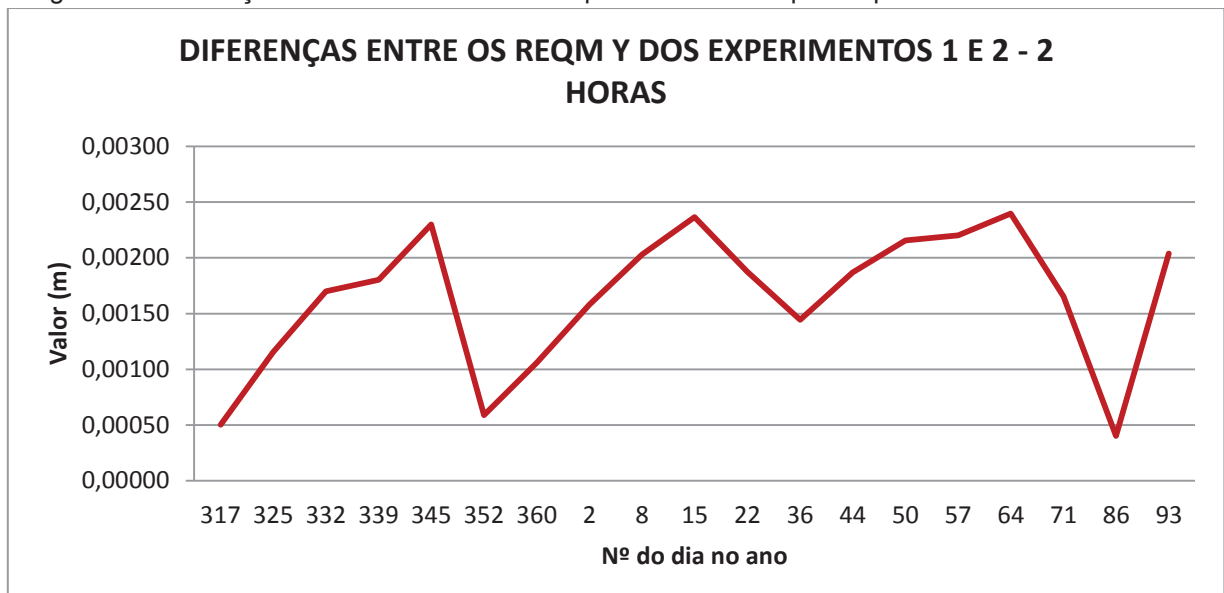
Figura 22: REQM Y para o processamento de 2 horas – experimentos 1 e 2.



Fonte: A autora (2019).

Observa-se na Figura 22 que no dia 332 obteve-se o maior valor de REQM, sendo de aproximadamente 0,4 m. O menor valor foi registrado no dia 44, sendo de aproximadamente 0,2 m.

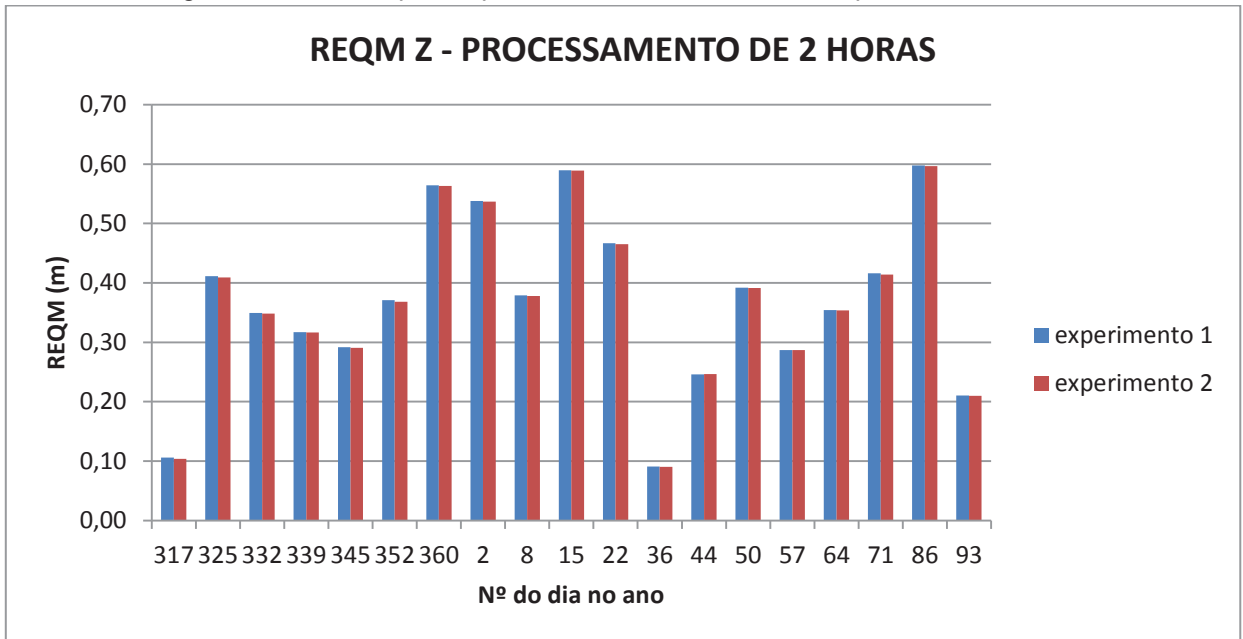
Figura 23: Diferenças entre os REQM Y dos experimentos 1 e 2 para o processamento de 2 horas.



Fonte: A autora (2019).

Nota-se na Figura 23 que a maior diferença entre os REQM da componente Y é de 0,0024 m no dia 64 e a menor é de aproximadamente 0,0004 m no dia 86.

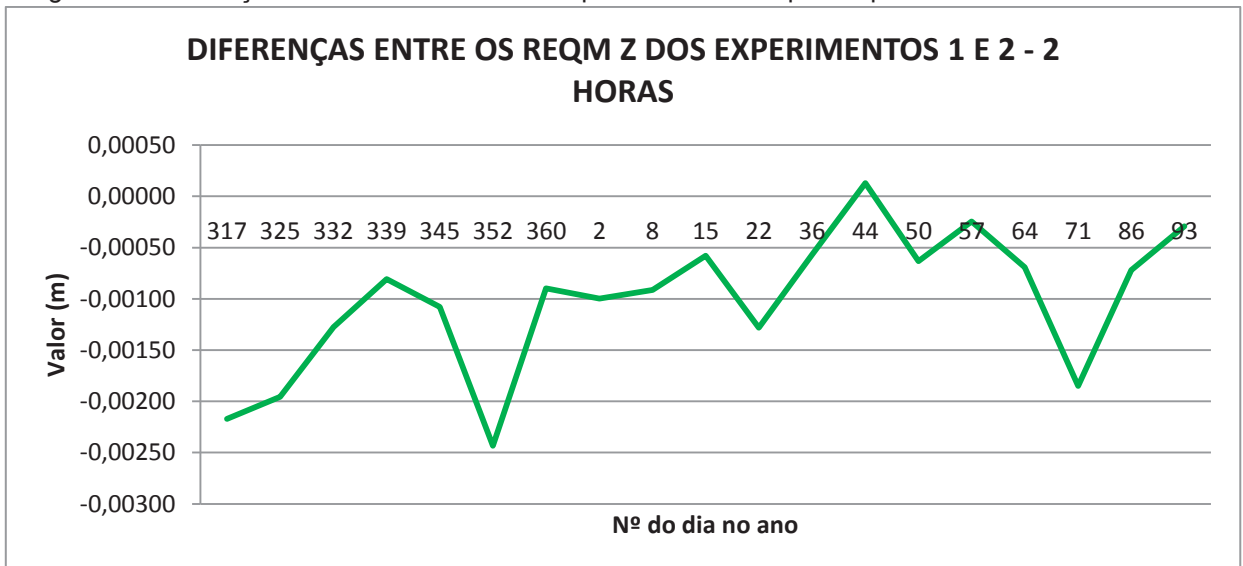
Figura 24: REQM Z para o processamento de 2 horas – experimentos 1 e 2.



Fonte: A autora (2019).

Constata-se observando a Figura 24 que o maior valor de REQM é de aproximadamente 0,6 m no dia 86, sendo que o menor valor é de aproximadamente 0,1 encontrado no dia 36.

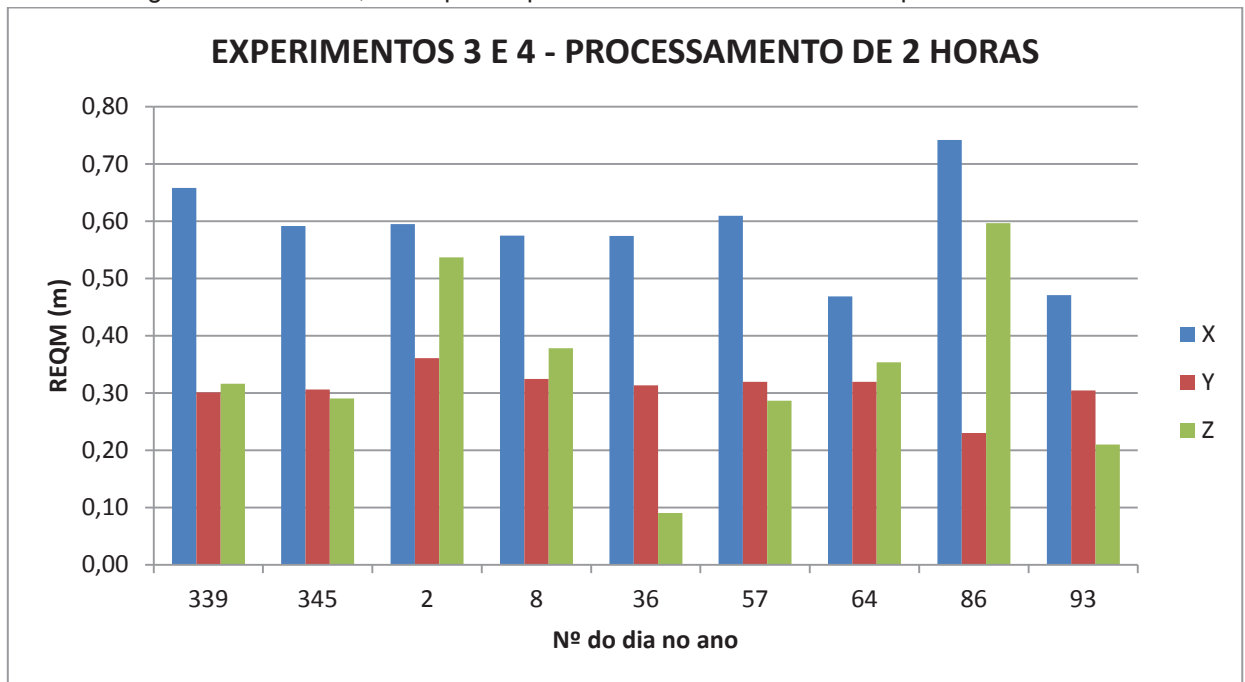
Figura 25: Diferenças entre os REQM Z dos experimentos 1 e 2 para o processamento de 2 horas.



Fonte: A autora (2019).

Nota-se na Figura 25 que a maior diferença entre os REQM da componente Z é de 0,0024 m no dia 352 e a menor é de aproximadamente zero no dia 44.

Figura 26: REQM X, Y e Z para o processamento de 2 horas – experimentos 3 e 4



Fonte: A autora (2019).

Constata-se na Figura 26 que os valores de REQM de X são maiores do que Y e Z, da mesma forma como observado nas Figuras 20, 22 e 24. O maior valor de REQM na componente X é do dia 86, sendo de 0,7419 m e o menor é do dia 64, sendo de 0,4687 m. Já para Y, o maior valor é do dia 2, sendo de 0,3609 m e o menor é do dia 86, sendo de 0,2302 m. Para a componente Z, o maior valor é no dia 86, sendo de 0,5967 m e o menor valor é no dia 36, sendo de 0,0903 m.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A proposta apresentada nesta pesquisa visou aplicar a metodologia da simples diferença no cálculo do DCB do receptor GPS Leica 1200 para utilizá-lo no cálculo dos efeitos de ordem superior da refração ionosférica e analisar o ganho obtido em comparação com a não correção de tais efeitos. Também foi investigada a possibilidade de propagação dos valores do DCB do receptor a fim de otimizar o tempo gasto com idas a campo.

A partir do resultado do cálculo dos DCBs do receptor Leica 1200, calculou-se o desvio padrão a fim de quantificar a dispersão dos DCBs calculados com o método apresentado, o qual apresentou um valor de 0,3639 m.

Experimentos foram realizados visando a avaliação do método proposto para a propagação numérica dos valores de DCB. Os resultados obtidos com a propagação foram comparados com dados provenientes do IGS para a estação UFPR, e se mostraram adequados, com uma diferença máxima de 0,260 m, permitindo assim uma avaliação positiva, visto que o valor é compatível com a precisão com que os valores de TEC são estimados pelo IGS. Ainda na etapa de validação do experimento, foram realizados processamentos PPP no modo estático pela plataforma online IBGE-PPP, utilizando dados adquiridos com o DCB propagado e com o DCB proveniente do IGS para a mesma estação. A média dos REQM para a latitude, longitude e altura são, respectivamente, 0,00252 m, 0,01404 m e 0,01543 m.

Para avaliar a acurácia do método proposto, foram feitos processamentos PPP modo estático no software RTKLIB com uma e duas horas de duração, seguindo os experimentos do Quadro 1. Os valores de REQM foram calculados com base nas discrepâncias entre as coordenadas obtidas e as de referência, e seus desvios-padrão.

Ao analisar os resultados dos experimentos, foi possível alcançar os objetivos propostos na pesquisa. No primeiro experimento, foi feito um processamento PPP de uma e depois duas horas com correção apenas dos efeitos de primeira ordem da refração ionosférica. Este experimento revelou que os PPPs com duração de duas horas obtiveram maior acurácia do que os de uma hora. Na componente X, houve uma melhora de 5,8%; na componente Y, de 10,2%; e na componente Z, de 11,4%.

No segundo experimento, realizou-se outro processamento PPP, também de uma e depois duas horas, desta vez com correções de primeira, segunda e terceira ordens da refração ionosférica, utilizando o DCB do receptor que foi calculado previamente. Os PPPs de duas horas se mostraram mais acurados do que os de uma hora. Na componente X, houve uma melhora de 5,7%; na componente Y, de 9,6% e na componente Z, de 11,4%.

Como já era esperado, os resultados obtidos no segundo experimento foram melhores dos que os obtidos no primeiro experimento, visto que foram feitas as correções de ordem superior da refração ionosférica. A diferença entre o primeiro e o segundo experimento, é da ordem do milímetro e, para o processamento com duração de duas horas, a diferença é 0,27 mm para X, 1,64 mm para Y e 1,02 mm para Z.

O terceiro e quarto experimentos são PPPs com correções de primeira ordem e de ordem superior da ionosfera, utilizando o DCB do receptor propagado para 3 e 4 semanas, respectivamente. Uma vez que o método foi validado, esses experimentos foram realizados com confiança. Em ambos os experimentos foram feitos novos PPPs, também com uma e duas horas de processamento. No experimento 3, houve uma piora de 7,9% e 1,9% nas componentes X e Y, respectivamente, e uma melhora de 4,9% na componente Z, quando comparados os resultados de duas horas com os de uma hora. Já no experimento 4, os resultados com processamento de duas horas apresentaram uma melhora de 6,6%, 19,6% e 28,4% para as componentes X, Y e Z, respectivamente. As diferenças entre os valores obtidos utilizando o DCB propagado e o DCB calculado são próximas de zero. Os resultados revelam uma acurácia tão próxima quanto se era esperada.

A metodologia apresentada neste trabalho de pesquisa mostrou-se compatível com os requisitos de acurácia atuais para o Sistema GPS e, portanto, é recomendada.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar e dar continuidade a esta pesquisa, são apresentadas algumas recomendações:

- testes com um período maior de propagação numérica dos resultados, como por exemplo 5 a 6 semanas;

- testes com outras linhas de base, como por exemplo de 10 a 15 km, inclusive com posicionamento no modo cinemático;
- estudos em diferentes períodos de atividade ionosférica, como por exemplo quando esteja mais calma e em períodos mais intensos como após o por do sol quando ocorre cintilação; e
- por fim, recomenda-se estudos para o cálculo do TEC com DPB, resolvendo as ambiguidades, utilizando a SD com a fase da onda portadora.

## REFERÊNCIAS

- ALIZADEH, M. M.; SCHUH, H.; SCHMIDT, M. Ray Tracing Technique for Global 3D Modeling of Ionospheric Electron Density Using GNSS Measurements. **Radio Science**, v. 50, n. 6, p. 539-553, 2015.
- AMMAR, M.; AQUINO, M.; VEETIL, S. V.; ANDREOTTI, M. Estimation and Analysis of Multi-GNSS Differential Code Biases Using a Hardware Signal Simulator. **GPS Solutions**, v. 22, n. 2, p. 32, 2018.
- APPLETON, E. V. Two Anomalies in the Ionosphere. **Nature**, v. 157, n. 3995, p. 691, 1946.
- ARIKAN, F.; NAYIR, H.; SEZEN, U.; ARIKAN, O. Estimation of Single Station Interfrequency Receiver Bias Using GPS-TEC. **Radio Science**, v. 43, n. 4, 2008.
- BANVILLE, S.; SANTERRE, R.; COCARD, M.; LANGLEY, R. B. Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Resolution. **Proceedings of ION NTM**, San Diego, California, 2008.
- BASSIRI, S.; HAJJ, G. A. Higher-Order Ionospheric Effects on the Global Positioning System Observables and Means of Modeling them. **Manuscripta geodaetica**, v. 18, n. 5, p. 280-280, 1993.
- BOUYA, Z.; TERKILDSEN, M.; NEUDEGG, D. Regional GPS Based Ionospheric TEC Model Over Australia Using Spherical Cap Harmonic Analysis. **38th COSPAR Scientific Assembly**. p. 4, 2010.
- CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de uma Frequência**. 209 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- CAMARGO, P. O. Quality of TEC Estimated with Mod\_Ion Using GPS and GLONASS Data. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2009, 2009.
- CAMARGO, P. O.; ARANA, D.; PEREIRA, V. A. S. Erro Sistemático Relativo Devido ao Hardware dos Receptores. **III Simpósio Brasileiro de Geomática**, Presidente Prudente, v. 1, p. 268-273, 2012.
- CHOI, B. K.; CHO, J. H.; LEE, S. J. Estimation and Analysis of GPS Receiver Differential Code Biases Using KGN in Korean Peninsula. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 9, p. 1590–1599, 2011.
- CHOI, B. K.; PARK, J.; ROH, K. M.; LEE, S. J. Comparison of GPS Receiver DCB Estimation Methods Using a GPS Network. **Earth, Planets and Space**, v. 65, n. 7, p. 707-711, 2013.
- COLLINS, P.; BISNATH, S.; LAHAYE, F.; HÉROUX, P. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. **Navigation**, v. 57, n. 2, p. 123-135, 2010.

- CORNELY, P. Receiver Biases in Global Positioning Satellite Ranging. **Global Navigation Satellite Systems-From Stellar to Satellite Navigation**. InTech, 2013.
- DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 580 p., 1990.
- DREWES, H. Procesamiento de Información GPS con Relación a Marcos de Referencia de Épocas Diferentes. **SIRGAS Workshop**, Aguascalientes, Mexico. 2004.
- EL GIZAWY, M. L. **Development of an Ionosphere Monitoring Technique Using GPS Measurements for High Latitude GPS Users**. 161 f. Thesis (MSc in Science) – University of Calgary, Calgary, 2003.
- FEHLBERG, E. Classical Fifth-, Sixth-, Seventh-, And Eighth-Order Runge-Kutta Formulas with Step-size Control. Washinton. D.C. NASA (NASA TR R-287), 1968.
- FONSECA JUNIOR, E. S. **O Sistema GPS como Ferramenta para Avaliação da Refração Ionosférica no Brasil**. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- FRITSCH, M.; DIETRICH, R.; KNÖFEL, C.; RÜLKE, A.; VEY, S.; ROTACHER, M.; STEIGENBERGER, P. Impact of Higher-Order Ionospheric Terms on GPS Estimates, **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005.
- GAO, Y.; LIU, Z. Z. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data. **Positioning**, v. 1, n. 01, p. 18-24, 2002.
- GE, Y.; ZHOU, F.; SUN, B.; WANG, S.; SHI, B. The Impact of Satellite Time Group Delay and Inter-Frequency Differential Code Bias Corrections on Multi-GNSS Combined Positioning. **Sensors**, v. 17, n. 3, p. 602, 2017.
- GOAD, C. C.; YANG, M. On Automatic Precision Airborne GPS Positioning. **Proc KIS94**. Banff, p. 131-138, 1994.
- HATCH, R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. **International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning**. v. 2, p. 1213-1231. 1983.
- HEGARTY, C.; POWERS, E. D.; FONVILLE, B. **Accounting for Timing Biases Between GPS, Modernized GPS, and Galileo Signals**. Naval Observatory Washington DC, 2005.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J. New Approaches in Global Ionospheric Determination Using Ground GPS Data. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 61, n. 16, p. 1237-1247, 1999.
- HOFMANN-WELLENHOF, B. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Wien; New York: Springer, 516 p, 2008.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: Theory and Practice**. 5. ed. Springer Science & Business Media, New York, 389 p. 2001.

HONG, C. **Efficient GPS Receiver DCB Estimation for Ionosphere Modeling Using Satellite-Receiver Geometry Changes**. Tese de Doutorado. PhD Thesis – Ohio State University, Ohio, 2007.

HONG, C.; GREJNER-BRZEZINSKA, D. A.; KWON, J. H. Efficient GPS Receiver DCB Estimation for Ionosphere Modeling Using Satellite-Receiver Geometry changes. **Earth Planets Space**, v.60, p. e25-e28, 2008.

HUINCA, S. C. M. **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR**. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP: Versão Abril 2017**. Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual\\_ppp.pdf](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf)>. Acesso em: 20 de outubro de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). – online – endereço eletrônico: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 2 de janeiro de 2019.

International Earth Rotation and Reference Service (IERS). **IERS Conventions 2010**. Disponível em: <<http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>>. Acesso em 27 de junho de 2018.

International GNSS Service (IGS) – online – endereço eletrônico: <<http://www.igs.org/products/data>>. Acesso em 7 de abril de 2018.

JIN, X. X. **Theory of Carrier Adjusted DGPS Positioning Approach and Some Experimental Results**. Tese de Doutorado. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft. 1996.

KAO, S.; TU, Y.; CHEN, W.; WENG, D.J.; JI, S.Y. Factors Affecting the Estimation of GPS Receiver Instrumental Biases. **Survey Review**, v. 45, n. 328, p. 59-67, 2013.

KEDAR, S.; HAJJ, G. A.; WILSON, B. D.; HEFLIN, M. B. The Effect of the Second Order GPS Ionospheric Correction on Receiver Positions. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 16, 2003.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric Effects on GPS. **GPS World Magazine**, Cleveland, v. 2, n. 4, p. 48-51, 1991.

KRYPIAK-GREGORCZYK, A.; WIELGOSZ, P.; BORKOWSKI, A. Ionosphere Model for European Region Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation. **Remote Sensing**, v. 9, n. 12, p. 1221, 2017.

KRYPIAK-GREGORCZYK, A.; WIELGOSZ, P.; JARMOLOWSKI, W. A New TEC Interpolation Method Based on the Least Squares Collocation for High Accuracy Regional Ionospheric Maps. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 4, p. 045801, 2017.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 560 p., 1995.

LI, H.; LI, B.; LOU, L.; YANG, L.; WANG, J. Impact of GPS Differential Code Bias in Dual- and Triple-Frequency Positioning and Satellite Clock Estimation. **GPS Solutions**, p. 897–903, 2017.

LIMA, C. M. D. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. PPP com Solução Inteira das Ambiguidades da Fase da Onda Portadora: Fundamentos Envolvidos e Análise de Acurácia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 5, 2016.

LIU, J.; CHEN, R.; WANG, Z.; ZHANG, H. Spherical Cap Harmonic Model for Mapping and Predicting Regional TEC. **GPS Solutions**, v. 15, n. 2, p. 109-119, 2011.

MANNUCCI, A. J.; WILSON, B. D.; YUAN, D. N.; HO, C. H.; LINDQWISTER, U. J.; RUNGE, T. F. A Global Mapping Technique for GPS Derived Ionospheric Total Electron Content Measurements. **Radio Science**, v. 33, n. 3, p. 565-582, 1998.

MANSOUR, M. A. M. **A Study on Modeling the Regional Ionosphere Using Multi-Constellation GNSS Observations for Single-Frequency PPP**. Tese de Doutorado. PhD. Thesis – Istanbul Technical University. 2016.

MARQUES, H. A. **Influência da Ionosfera no Posicionamento GPS: Estimativa dos Resíduos no Contexto de Duplas Diferenças e Eliminação dos Efeitos de 2ª E 3ª Ordem**. 152 f., Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX\_HO: Second and Third-Order Ionospheric Corrections for RINEX Observation Files. **GPS Solutions**, v. 15, n. 3, p. 305-314, 2011.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M. Análise dos Efeitos Ionosféricos de Ordem Superior no Ciclo Solar 24 e Influência no Posicionamento GNSS Absoluto. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p. 879-901, 2014.

MATSUOKA, M. T. **Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na Região Brasileira**. 264 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2007.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC Usando Dados de Receptores GPS de Dupla Frequência para Produção de Mapa da Ionosfera para Região Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 1, p. 14-27, 2004.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da Ionosfera Usando Dados de Receptores GPS Durante um Período de Alta Atividade Solar e Comparação com Dados de Digissondas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 565-582, 2009.

MATSUOKA, M. T.; COLLISCHONN, C.; KLEIN, I.; CAMARGO, P. O.; PEREIRA, V. A. S. Impacto de Tempestade Geomagnética na Ionosfera e no Posicionamento com GNSS: Estudo de Caso para 20 de novembro de 2003 na Região Brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 19, p. 14-33, 2013.

McNAMARA, L. F. **The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding**. Krieger publishing company, 1991.

MEZA, A. **Three Dimensional Ionospheric Models from Earth and Space Based GPS Observations**. Tese de Doutorado. PhD Thesis – Universidad Nacional de La Plata, 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 476 p., 2008.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, 2009.

MONTENBRUCK, O.; HAUSCHILD, A.; STEIGENBERGER, P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. **Navigation: Journal of the Institute of Navigation**, v. 61, n. 3, p. 191-201, 2014.

MORESCKI JUNIOR, L. F. M. **Determinação dos Parâmetros PCOs e PCVs de Antenas GNSS Utilizando Propagação Numérica**. 135 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ODIJK, Dennis. Fast Precise GPS Positioning in the Presence of Ionospheric Delays. **Publications on Geodesy**, 52, 2002.

OLIVEIRA FILHO, K. S. O.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia – Instituto de Física, 708 p. 2000.

ORÚS, R.; HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J. Improvement of Global Ionospheric VTEC Maps by Using Kriging Interpolation Technique. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, n. 16, p. 1598-1609, 2005.

PROL, F. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa da Tendência Diferencial do Código nos Receptores GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, 2014.

RODRIGUES, D. D. **Rede Geodésica de Precisão no Estado de Minas Gerais: Avaliação de Diferentes Estratégias de Processamento e Ajustamento**. 222 f.

Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

RODRIGUES, F. S. R. **Estudo das Irregularidades Ionosféricas Equatoriais Utilizando Sinais GPS**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert Generalizada no Posicionamento de Alta Precisão: Fundamentação Teórica e Exemplificações. **Revista Brasileira de Geofísica**, p. 161-172, 2000.

SCHAER, S. **Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System**. Ph.D. Thesis, Astronomisches Institute, Universität Bern, Switzerland, 1999.

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

SILVA, R. P. **Efeitos de Eventos HILDCAA na Ionosfera Equatorial Sobre a Região Brasileira: Comparação de Metodologias**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

SKONE, S. **Wide Area Ionosphere Grid Modelling in the Auroral Region**. University of Calgary, 1998.

TAKASU, T. RTKLIB: Open source program package for RTK-GPS. **Proceedings of the FOSS4G**, 2009.

VISKI, A. R. **Análise da Atenuação do Efeito Multicaminho no Posicionamento GPS de Plataformas Lagrangeanas e Eulerianas em Massas de Água**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2012.

WEBSTER, I. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. M. Sc. E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 1993.

WILSON, B.; MANNUCCI, A. Extracting Ionospheric Measurements from GPS in the Presence of Anti-Spoofing. **Proceedings of ION GPS-94**, p. 1599-1608, 1994.

ZHANG, H.; XU, P.; HAN, W.; GE, M.; SHI, C. Eliminating Negative VTEC in Global Ionosphere Maps Using Inequality-Constrained Least Squares. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 6, p. 988-1000, 2013.

ZHANG, W.; ZHANG, D. H.; XIAO, Z. The Influence of Geomagnetic Storms on the Estimation of GPS Instrumental Biases. **Annales Geophysicae. Copernicus GmbH**, p. 1613-1623. 2009.

ZHANG, D. H.; ZHANG, W.; LI, Q.; SHI, L. Q.; HAO, Y. Q.; XIAO, Z. Accuracy Analysis of the GPS Instrumental Bias Estimated from Observations in Middle and Low Latitudes. **Annales Geophysicae. Copernicus GmbH**, p. 1571. 2010.