
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

**AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS NO
POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO GNSS NO BRASIL**

GILMARA DANNIELLE DE CARVALHO ROCHA

Dissertação de Mestrado

Recife/2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

Gilmara Dannielle de Carvalho Rocha

AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS NO
POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO GNSS NO BRASIL

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentado, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Geodésia Aplicada defendida no dia 06/03/2015.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques

Coorientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico

Recife/2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- R672a Rocha, Gilmara Dannielle de Carvalho.
Avaliação e mitigação dos efeitos ionosféricos no posicionamento por ponto preciso GNSS no Brasil / Gilmara Dannielle de Carvalho Rocha. - Recife: O Autor, 2015.
105 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques.
Coorientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2015.
Inclui Referências e Anexo.
1. Engenharia Cartográfica. 2. Posicionamento GNSS. 3. Estimativa da Ionosfera. 4. PPP. 5. Mapas Globais e Regionais da Ionosfera. I. Marques, Haroldo Antonio. (Orientador). II. Monico, João Francisco Galera. (Coorientador). III. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-160

**"AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DOS EFEITOS IONOSFÉRICOS NO
POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO GNSS NO BRASIL"**

POR

GILMARA DANNIELLE DE CARVALHO ROCHA

Dissertação defendida e aprovada em 06/03/2015.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. HAROLDO ANTONIO MARQUES

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. SÍLVIO JACKS DOS ANJOS GARNÉS

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. WAGNER CARRUPT MACHADO

Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Gerência de Geodésia e Cartografia de Florianópolis - SC.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela fé, saúde e toda realização alcançada.

Aos meus pais, Edilene e Gilmar, pelo amor, dedicação e apoio incondicional. A meu irmão, que mesmo tão novo se preocupa com meus estudos. Agradeço à toda minha família por sempre acreditar no meu potencial, e por torcerem pelo meu sucesso.

Agradeço à Prof. Haroldo Marques pela orientação, pelos conselhos ao longo dos dois anos de mestrado, por acreditar que poderia desenvolver um trabalho de qualidade e incentivar em continuar no caminho da pesquisa científica. Muito obrigada por tudo que o senhor me proporcionou, espero transmitir todo conhecimento adquirido ao longo da minha vida acadêmica. Obrigada pela confiança!

Ao Prof. João Francisco Monico Galera pela orientação, sugestões e apoio no desenvolvimento da minha pesquisa. Sempre admirei seu trabalho como pesquisador e professor, e tê-lo como coorientador foi muito gratificante e me fez olhar a pesquisa de outra forma. Ao professor Sílvio Jacks, por ter sido tão criterioso ao longo das avaliações e pelas grandes contribuições, o senhor é um exemplo de professor e pesquisador que rege pelo conhecimento e pela dedicação científica.

Agradeço à Anderson Reis meu amigo de graduação e de mestrado, obrigada pelo apoio, contribuições e por me ajudar nos momentos complicados e me mostrar que um pouco de persistência conseguiria alcançar meus objetivos, você foi fundamental nessa etapa, muito obrigada! Agradeço minha amiga Chaenne Alves, pelo incentivo e apoio, suas palavras e exemplo de vida me impulsionaram a desenvolver esta pesquisa.

Agradeço aos meus amigos de mestrado, Hélder Gramacho, André Rocha, Emanuel Gomes, Ester Ribeiro, Elaine Cristina e os demais com os quais tive o prazer de conviver ao longo desses anos.

Agradeço à professora Luciene Gama, que sempre me incentivou e acreditou no meu potencial, a senhora foi fundamental na trajetória até o mestrado. Muito obrigada pelo apoio, dedicação com os projetos de pesquisa e amizade que ficará pra sempre!

Agradeço ao meu amado Noberto Coelho por sempre torcer pelo meu sucesso, estando ao meu lado em todos os momentos, você foi de extrema importância

durante minha passagem por Recife. Obrigada pelas leituras incansáveis, discussão dos resultados, diversas impressões da dissertação e pelo carinho!

Aos meus amigos que torceram pelo meu sucesso e comemoram comigo minhas etapas concluídas e minhas vitórias.

Agradeço aos professores da Pós-Graduação, especialmente a Prof.^a Ana Lúcia Candeias, que ajudou desde o início do mestrado com suas palavras de apoio que me tranquilizaram.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação pela infraestrutura e financiamento participações em eventos.

Obrigada a todos pelo convívio nessa etapa importante e pelo apoio!

Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4:13

“Não é na ciência que está a felicidade, mas na aquisição da ciência”.

Edgar Allan Poe

RESUMO

Uma das maiores fontes causadoras de erro no posicionamento GNSS é a ionosfera, sendo que o efeito provocado por esta camada da atmosfera é um dos mais impactantes no processo de estimativa das coordenadas, principalmente para dados coletados com receptores de simples frequência. A modelagem matemática da refração ionosférica é complexa devido às variações diárias, sazonais, de curto e longo período, além de outros fenômenos que ocorrem na atmosfera, tal como a cintilação ionosférica. Em se tratando de posicionamento absoluto com receptores de simples frequência, seja Posicionamento por Ponto Simples (PP) ou Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), estratégia adequada de correção dos efeitos ionosféricos devem ser adotadas. A correção da ionosfera para dados de simples frequência pode ser realizada a partir de modelo matemático, tal como o de Klobuchar, Mapas Globais ou Regionais da Ionosfera ou a partir da estimativa residual da ionosfera. Quando se tem disponível dados de duas frequências é possível utilizar a combinação *ion-free*, a qual permite eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Contudo esta combinação faz com que as ambiguidades percam suas características de números inteiros, bem como realça outros níveis de ruído tal como o multicaminho. Uma possibilidade para atenuar os efeitos da ionosfera é a aplicação da estimativa dos efeitos residuais junto com as coordenadas incógnitas da estação e outros parâmetros. Neste caso, os efeitos da ionosfera podem ser tratados como um processo estocástico no Filtro de Kalman e se pode aplicar tal estratégia para dados de simples ou dupla frequência. Essa estratégia pode facilitar a solução das ambiguidades como inteiras e consequentemente permite a obtenção de resultados mais acurados no posicionamento geodésico. Dentro deste contexto, esta dissertação de mestrado apresenta a avaliação da acurácia do posicionamento absoluto GPS com aplicação de diferentes estratégias de correção da ionosfera. Foram realizados processamentos no modo PPP com dados GPS coletados em estações da RBMC em períodos de alta e baixa atividade solar para os anos de 2010 a 2013, onde se aplicou a correção da ionosfera advinda do modelo de Klobuchar, dos mapas globais (GIM – *Global Ionospheric Map*) e regionais (LPIM – *La Plata Ionospheric Model*), além da estimativa residual da ionosfera. As coordenadas estimadas foram comparadas com aquelas advindas da solução semanal SIRGAS-CON, a qual é

dada atualmente em ITRF2008 e o Erro Médio Quadrático (EMQ), seja diário ou anual foi utilizado como medidor de acurácia. Ao aplicar as correções da ionosfera advinda dos mapas globais e regionais na estimativa de coordenadas no PPP utilizando somente medidas de código, observou-se melhoria de até 80% em relação ao PPP sem correção da ionosfera. O PPP com correção ionosférica advinda dos mapas regionais produziu melhorias diárias da ordem de 10% em relação ao uso dos mapas globais. Com base nas melhorias produzidas com a utilização do modelo ionosférico regional, foi proposta a modificação do modelo estocástico do ajustamento tendo em vista que somente o modelo funcional é afetado pelas correções ionosféricas advindas dos mapas. Com relação à estimativa residual da ionosfera foram realizados experimentos envolvendo medidas de código e fase na frequência L1 com geração de séries temporais anuais de coordenadas para diversas estações da RBMC, cuja acurácia alcançada foi da ordem de 10 cm no PPP com solução diária.

Palavras chaves: Posicionamento GNSS; Estimativa da Ionosfera; PPP; Mapas Globais e Regionais da Ionosfera.

ABSTRACT

One of the largest sources of errors in the GNSS positioning is the ionosphere considering that the effect caused by that atmosphere layer is one of the most impacting in the coordinate estimation process, especially for data collected with single frequency receivers. Mathematical modeling of ionospheric refraction is complex due to daily variation in as well as, seasonal short and long period and also other phenomena occurring in the atmosphere such as ionospheric scintillation. Concerning the absolute positioning with single frequency receivers, whether Single Point Positioning (PP) or by Precise Point Positioning (PPP), appropriate strategy to correct the ionospheric effects should be adopted. The ionosphere correction for single frequency data can be performed from mathematical model, such as Klobuchar, Global or Regional Ionosphere maps or from residual ionosphere estimating. When one has available data from two frequencies it is possible to apply the ionosphere free combination which allows eliminating the first order ionosphere effects. However, this combination makes ambiguities lose its integer characteristics as well as amplify other noise levels as for instance multipath. One possibility to mitigate the ionosphere effects is the application of the ionosphere residual estimation along with coordinates station and other parameters. In this case, the ionosphere effects can be treated as a stochastic process in the Kalman filter where it is possible to apply that strategy for single or dual frequency data. This strategy can facilitate the integer ambiguities resolutions and consequently allows obtaining more accurate results in geodetic positioning. Inside this context, this master thesis presents the accuracy evaluation of the GPS absolute positioning by applying different strategies for ionosphere corrections. Processing was performed in PPP mode with GPS data collected in brazilian RBMC stations in periods of high and low solar activities for the years 2010-2013, where it was applied ionosphere correction from Klobuchar model, global (GIM - Global Ionospheric Map) and regional (LPIM - La Plata Ionospheric Model) maps and the residual ionosphere estimation. The estimated coordinates were compared with those coming from SIRGAS-CON in a weekly solution which is currently given in ITRF2008 and Root Mean Square (RMS), either daily or annually, was used as accuracy measuring. When applying ionosphere corrections from global and regional maps in the PPP coordinates estimation using only code measurements, it was observed improvements of up to 80% comparing

with PPP without ionosphere correction. The PPP with ionospheric correction coming from regional maps produced daily improvements of around 10% in relation to applying global maps. Based on improvements reached with corrections from regional ionospheric model, it was proposed the modification of the stochastic model for adjustment considering that only the functional model is affected by the ionospheric corrections coming from maps. Regarding the residual ionosphere estimation experiments were performed involving code and phase measurements in the L1 frequency with generation of coordinates annual time series considering the chosen RBMC stations whose accuracy achieve approximately 10 cm in PPP with daily solution.

Keywords: GNSS positioning; Ionosphere Estimation; PPP; Global and regional ionosphere maps.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Histórico do número de manchas solares (ciclos solares).	45
Figura 2 – Regiões geográficas da ionosfera.	46
Figura 3 – Região geográfica de cobertura do LPIM.	52
Figura 4 – Mapas diários de VTEC para o dia 096 de 2010.	54
Figura 5 – Interpolação do VTEC para localização geográfica do usuário.....	55
Figura 6 – Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera.....	56
Figura 7 – Fluxograma da metodologia envolvida no processamento dos dados.....	62
Figura 8 – Localização das estações da RBMC utilizadas nos processamentos de dados GPS.	63
Figura 9 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétrica e altimétrica nos processamentos com código C/A no modo época por época.	69
Figura 10 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código e fase C/A+L1 no modo cinemático.	70
Figura 11 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código e fase C/A+L1 no modo estático.....	70
Figura 12 – Índice 10,7 para os anos de 2011 e 2012.....	72
Figura 13 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de alta atividade solar.	73
Figura 14 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de baixa atividade solar.	73

Figura 15 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de alta atividade solar.	75
Figura 16 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de baixa atividade solar.	76
Figura 17 – Índice Kp (atividade geomagnética) para os dias de março.	78
Figura 18 – Série temporal do erro diário em DE, DN e DU para a estação NAUS. .	79
Figura 19 – Índice 10,7 cm para todo ano de 2013.	80
Figura 20 – Série temporal do EMQ 3D e do melhoramento aplicando os mapas do GIM e LPIM sem ponderação.	81
Figura 21 – Serie temporal diária da precisão em DE, DN e DU para a estação NAUS no posicionamento com diferente estratégia de ponderação.	84
Figura 22 – Índice Kp para o dia 19/02/2014.	86
Figura 23 – Erro e Precisão das componentes planimétrica e altimétrica em função da precisão da pseudo-observação ionosférica.	86
Figura 24 – Série temporal diária para estação RECF dos erros e precisão para as componentes planimétricas e altimétrica, a estimativa da ionosfera, ambiguidades na L1 e ângulo de elevação para cada satélite.	88
Figura 25 – Série temporal diária do erro nas componentes planimétricas e altimétrica aplicando a estimativa da ionosfera com precisão de 50 metros para a pseudo-observação advindo do modelo de Klobuchar.	90
Figura 26 – Relatório da estação POAL (seção antena).	91
Figura 27 – Série temporal anual da precisão 3D aplicando a estimativa da ionosfera e a combinação <i>ion-free</i>	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acurácia e latência dos produtos IGS.....	34
Tabela 2 – Fontes de erros e efeitos no GNSS.	38
Tabela 3 - Erro máximo da ionosfera em metros no sentido vertical.	47
Tabela 4 – Estratégias adotadas nos processamentos.	64
Tabela 5 – Análises estatísticas aplicando as correções da ionosfera com código e fase.....	71
Tabela 6 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de alta atividade solar.	74
Tabela 7 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de baixa atividade solar.	74
Tabela 8 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de alta atividade solar.	76
Tabela 9 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de baixa atividade solar.	77
Tabela 10 – EMQ diário para os dias 76 e 78 na estação NAUS.	79
Tabela 11– EMQ 3D anual e melhoramento no posicionamento com aplicação do GIM e LPIM.....	82
Tabela 12 – EMQ 3D anual (m) e o melhoramento (%) no PPP aplicando os mapas do GIM e LPIM.	84
Tabela 13 – Precisões nas componentes DE, DN e DU (m) e o melhoramento (%) no PPP aplicando os mapas do GIM e LPIM.	85
Tabela 14 – Média anual dos erros no SGL para as componentes DE, DN e DU em metros.....	90

LISTA DE SIGLA E ABREVIATURAS

C/A	– <i>Course Acquisition</i>
CALIBRA	– <i>Countering GNSS high Accuracy Applications Limitations due to Ionospheric Disturbances in Brazil</i>
CODE	– <i>Centre for Orbit Determination for Europe</i>
DCB	– <i>Differential Code Bias</i>
DD	– <i>Dupla Diferença</i>
EMBRACE	– <i>Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial</i>
EMQ	– <i>Erro Médio Quadrático</i>
ESA	– <i>European Space Agency</i>
FCT	– <i>Faculdade de Ciências e Tecnologia</i>
FAIM	– <i>Fully Analytical Ionospheric Model</i>
GAPS	– <i>GPS Analysis and Positioning Software</i>
GIM	– <i>Global Ionosphere Map</i>
GLONASS	– <i>GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
IBGE	– <i>Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IGS	– <i>International GNSS Service</i>
INPE	– <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
IONEX	– <i>Ionosphere Exchange format</i>
IRI	– <i>International Reference Ionosphere</i>
ITRF	– <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JPL	– <i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LPIM	– <i>La Plata Ionospheric Model</i>
MATLAB	– <i>Matrix Laboratory</i>

MMQ	– Método dos Mínimos Quadrados
MVC	– Matriz Variância-Covariância
NRCan	– <i>Natural Resources Canada</i>
PPP	– Posicionamento por Ponto Preciso
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS
RINEX	– <i>Receiver Independent Exchange format</i>
RTPPP	– <i>Real Time PPP</i>
SA	– <i>Selective Availability</i>
SGL	– Sistema Geodésico Local
SIRGAS	– Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SIRGAS-CON	– SIRGAS de funcionamento CONTínuo
SLIM	– <i>Semi-Empirical Low-Latitude Ionospheric Model</i>
TEC	– <i>Total Electron Content</i>
UFPE	– Universidade Federal de Pernambuco
UNESP	– Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UNLP	– <i>Universidad Nacional de La Plata</i>
UPC	– <i>Universitat Politècnica Catalunya</i>
VTEC	– Vertical TEC

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações Iniciais	19
1.2 Contextualização do Trabalho	23
1.3 Objetivos da Pesquisa	26
1.4 Justificativa da Pesquisa.....	27
1.5 Conteúdo do Trabalho	28
2. INTRODUÇÃO AO AJUSTAMENTO	29
2.1 Método dos Mínimos Quadrados	29
2.2 Ajustamento Recursivo pelo MMQ.....	31
3. POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO.....	34
3.1 Modelo Funcional e Estocástico do PPP	35
4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO	43
4.1 Introdução à Ionosfera	43
4.2 Modelos de Correção da Ionosfera.....	47
4.2.1 Combinação Linear Livre da Ionosfera (<i>ion-free</i>).....	47
4.2.2 Modelo de Klobuchar	50
4.2.3 Mapas Globais da Ionosfera.....	51
4.2.4 Mapa Regional da Ionosfera LPIM	51
4.3 Interpolação do VTEC a partir dos mapas da ionosfera	55
4.4 Estimativa dos efeitos residuais da ionosfera	57
4.4.1 Modelo Matemático do PPP com estimativa da ionosfera	57

5. METODOLOGIA.....	61
5.1 Estratégias de processamento no <i>software</i> RT_PPP	63
5.2 Adaptação do RT_PPP para interpolação do VTEC advindo dos mapas ionosféricos regionais	65
5.3 Análise dos resultados	66
6. EXPERIMENTOS REALIZADOS, RESULTADOS E ANÁLISES	68
6.1 Avaliação dos modelos de correção da ionosfera no posicionamento com solução diária.....	68
6.1.1 Avaliação do PPP (código e fase) com diferentes estratégias de correção da ionosfera	68
6.1.2 Avaliação do PPP com código para dias com alta e baixa atividade solar	72
6.2 Avaliação dos modelos globais e regionais da ionosfera	77
6.2.1 Análise do PPP aplicando GIM e LPIM com mesma estratégia de peso	78
6.2.2 Aplicação do GIM e LPIM no PPP considerando a incerteza do mapa ionosférico	83
6.3 Avaliação da estimativa dos efeitos residuais da ionosfera no PPP	85
6.3.1 Análise do valor a priori e da incerteza da pseudo-observação da ionosfera.....	85
6.3.2 Análise de séries temporais no PPP com a estimativa da ionosfera.....	89
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
7.1 Conclusões.....	93
7.2 Recomendações.....	96

REFERÊNCIAS 97

ANEXO A – Modelo de Klobuchar..... 103

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Dentre os métodos de posicionamento a partir do *Global Navigation Satellite System* (GNSS), encontra-se em evidência atualmente o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), o qual pode ser realizado no modo pós-processado ou em tempo real (RTPPP). Este método envolve o uso de um receptor ao nível de usuário e proporciona acurácia da ordem de centímetros na estimativa de coordenadas, porém, requer a disponibilidade de órbitas precisas e correções dos erros dos relógios dos satélites; além da aplicação de estratégias de minimização e modelagem dos efeitos sistemáticos, tais como: efeitos relativísticos, fase *windup*, refração troposférica e ionosférica, perdas de ciclos, multicaminho, atraso de *hardware* e aqueles relacionados com a estação, como por exemplo, movimento das placas tectônicas, marés terrestres e oceânicas (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; HOFFMAN WELLENHOF et al, 2001; MONICO, 2008; CAI, 2009; MARQUES, 2012).

Dentre os efeitos envolvidos com a propagação dos sinais, os que causam maiores impactos no posicionamento são os relacionados com a ionosfera e troposfera (CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003; ABDEL-SALAM, 2005; SAPUCCI, 2005; MONICO, 2008; CAI, 2009; MARQUES, 2012).

O erro associado à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal e diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) contidos em uma coluna de seção transversal de 1 m² que se estende ao longo do caminho do sinal entre o satélite e o receptor (LEICK, 1995; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003; SEEBER, 2003). O TEC varia no tempo e no espaço, sendo influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética (LEICK, 1995; MATSUOKA, 2003; SEEBER, 2003); sendo, portanto de difícil modelagem.

No caso de posicionamento geodésico no modo relativo considerando linhas de base curtas, a maioria dos efeitos da ionosfera e outros são eliminados ao aplicar combinação de Dupla Diferença (DDs) no ajustamento dos dados. Porém, o mesmo

não ocorre para longas linhas de base, onde os efeitos da ionosfera tornam-se menos correlacionados nas estações envolvidas. Em se tratando de posicionamento absoluto com receptores de simples frequência, seja Posicionamento por Ponto Simples (PP) ou Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), estratégia adequada para a correção dos efeitos ionosféricos deve ser adotada.

Quando se têm disponíveis observações GNSS de dupla frequência pode-se aplicar a combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*). Esta combinação permite eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, os quais representam em torno de 99% do atraso total provocado nas medidas, sendo que o restante fica a cargo dos efeitos de ordem superior (MARQUES, 2008; MARQUES et al., 2009). Contudo esta combinação faz com que as ambiguidades percam suas características de números inteiros, bem como realça outros níveis de ruído tal como o multicaminho.

Para usuários que dispõem de receptores de simples frequência, outras estratégias devem ser adotadas para corrigir a ionosfera, como por exemplo, o uso do modelo de Klobuchar que proporciona correção de aproximadamente 50% do efeito total da ionosfera ou a aplicação da correção ionosférica a partir dos Mapas Globais (GIM – *Global Ionosphere Maps*) ou Regionais da Ionosfera (RIM – *Regional Ionosphere Maps*) ou ainda aplicando a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera no ajustamento dos dados (KLOBUCHAR, 1996; SCHAER et al., 1998; MATSUOKA, 2003; BRUNINI et al., 2008, MARQUES, 2008).

Os Mapas Globais da Ionosfera podem ser obtidos nos centros que contribuem com o *International GNSS Service* (IGS), como por exemplo, o *Center for Orbit Determination* (CODE), *European Space Agency* (ESA), o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) e a *Universitat Politècnica Catalunya* (UPC). Esses mapas são fornecidos no formato IONEX (*IONosphere map Exchange format*) com valores de VTEC (Conteúdo Total de Elétrons na direção vertical) distribuídos em grades (*grids*) com resolução espacial 5° x 2,5° em longitude e latitude, respectivamente, e 2 horas de resolução temporal (SCHAER et al., 1998; IGS, 2014). Em relação aos mapas regionais, estes têm sido alvo de investigações da comunidade científica nacional e internacional nos últimos anos, podendo-se citar, por exemplo, o desenvolvimento do modelo Mod_Ion da UNESP (Universidade Estadual Paulista) (CAMARGO, 1999), o LPIM desenvolvido na UNLP (*Universidad Nacional de La Plata*) (BRUNINI et al., 2008), sendo disponibilizado dentro do contexto do projeto SIRGAS (Sistema

de Referência Geocêntrico para as Américas) e os desenvolvimentos no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) com o projeto EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) que utiliza o modelo SUPIM (*Sheffield University Plasmaspher Ionosphere Model*) (INPE, 2014).

Para a estimativa de VTEC no caso dos mapas regionais, geralmente, utilizam-se dados GNSS coletados em uma rede geodésica mais densa (maior número de estações) na região. Além disto, os mapas regionais são disponibilizados com resolução temporal e espacial maior que os mapas globais de forma que se esperam valores mais realísticos de VTEC para a região proporcionando melhorias em termos de posicionamento. No caso dos mapas regionais de *La Plata*, estes utilizam dados GNSS coletados na rede SIRGAS e os valores de VTEC são disponibilizados em arquivos horários com resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ de latitude e longitude, respectivamente.

No caso da estimativa da ionosfera no PPP, aplica-se a correção advinda de um modelo (Klobuchar ou GIM) e os efeitos residuais da ionosfera para cada satélite são estimados no ajustamento recursivo dos dados GNSS juntamente com outros parâmetros, tais como: coordenadas do usuário, erro do relógio do receptor, atraso troposférico e ambiguidades. Neste caso, a ionosfera pode ser tratada como um parâmetro estocástico no ajustamento com a introdução de uma pseudo-observação para cada parâmetro e um determinado desvio-padrão (MARQUES, 2008; MARQUES, 2012). O desvio-padrão deve ser adotado pelo usuário, no entanto é necessário conhecer as condições da ionosfera no momento em que os dados foram coletados, o que pode ser feito com o auxílio de índices geomagnéticos, tal como o índice KP e outros.

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta a avaliação da acurácia do PPP GPS aplicando o modelo de Klobuchar, os mapas globais e regionais da ionosfera para dados de simples frequência utilizando apenas as observações de código. Para a estimativa da ionosfera foi utilizado dados de simples frequência com o código e fase e, cujos resultados foram comparados com a solução advinda da combinação *ion-free*. Os dados GPS coletados nas estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) foram processados no *software* RT_PPP (*Real time PPP*) desenvolvido por Marques (2012) e as coordenadas estimadas foram comparadas

com aquelas advindas da solução semanal SIRGAS-CON, as quais são dadas atualmente em ITRF2008 (*International Terrestrial Reference Frame* – 2008).

A estimativa das coordenadas foi realizada com solução época por época, além do modo cinemático e estático considerando o uso de órbitas precisas, correções de relógios dos satélites e diversos outros efeitos que devem ser corrigidos para a realização do PPP. As análises foram realizadas em termos de Erro Médio Quadrático (EMQ) diário e anual com geração de séries temporais para períodos de agosto de 2010, março e novembro de 2011, outubro e novembro de 2012 e para todos os dias de 2013. Com base nas melhorias produzidas com a utilização do modelo ionosférico regional foi proposta a modificação do modelo estocástico do ajustamento tendo em vista que somente o modelo funcional é afetado quando se aplica as correções ionosféricas derivadas de diferentes modelos.

Com relação à estimativa da ionosfera foram realizados experimentos no modo estático envolvendo medidas de código e fase na frequência L1 com geração de séries temporais anuais das coordenadas para 4 estações da RBMC, sendo que as soluções com a estimativa da ionosfera foram comparadas com as soluções quando aplicado a combinação *ion-free* para dados de dupla frequência.

1.2 Contextualização do Trabalho

As pesquisas relacionadas com a modelagem da ionosfera e com o método PPP tem sido alvo de investigações da comunidade científica nacional e internacional (MATSUOKA et al. 2002; ALVES, 2010; MARQUES, 2012; SCHOENEMANN, 2014). No que concerne ao desenvolvimento e implementação de estratégias de correção da ionosfera, estudos sobre a interferência, perturbações, modelagem e desempenho entre o modelo de Klobuchar e os mapas globais da ionosfera, aplicados na região brasileira, têm sido realizados nos últimos anos pela comunidade geodésica, tais estudos são apresentados a seguir.

Entre as contribuições da comunidade nacional, pode-se destacar: Camargo (1999) que desenvolveu o modelo regional da ionosfera (Mod_Ion) para receptores de simples frequência no Brasil. Matsuoka e Camargo (2002) avaliaram o desempenho do Mod_Ion em relação ao Modelo de Klobuchar. Aguiar (2005) implementou o algoritmo filtro de Kalman no Mod_Ion para aplicações em tempo real. Matsuoka (2007) estudou o comportamento do erro devido à ionosfera a partir de estações GPS da RBMC e da rede IGS da América do Sul durante um período de máxima atividade do ciclo solar 23.

Marques (2008) estudou a influência da ionosfera no posicionamento GPS e desenvolveu o programa RINEX_H0 para correção dos efeitos ionosféricos de ordem superior. Matsuoka et al., (2010) avaliaram o desempenho do GIM aplicado no posicionamento por ponto para um período de intensa tempestade geomagnética ocorrida no ano de 2003, onde os dados processados com os mapas globais foram comparados com o posicionamento sem correção da ionosfera. Os resultados mostraram uma melhora média na componente vertical de 66% ao aplicar o GIM. Machado (2012) estabeleceu e avaliou uma metodologia baseada em redes neurais artificiais, para prever o atraso ionosférico regional, visando à geração de estação de referência virtual em tempo real. Marques (2012) desenvolveu o programa RT_PPP que permite processar dados GPS no modo PPP, seja em tempo real ou pós-processado, onde se tem a opção de estimativa da ionosfera para dados de simples frequência.

Diversos trabalhos contribuíram na avaliação e melhoria das estratégias de correção dos efeitos da ionosfera. Para compreender o comportamento da ionosfera

no Brasil, Fonseca Junior (2002) elaborou uma série histórica entre os anos de 1997 a 2001 com os valores de TEC para as estações da RBMC, em intervalos de duas horas, servindo de suporte para novas pesquisas e para o aprimoramento de modelos ionosféricos futuros.

Veronez (2004) desenvolveu um modelo regional para a correção do erro ionosférico aplicando o ajustamento sequencial, onde o erro foi representado por um modelo polinomial, que proporcionou respectivamente uma melhora de 33% e 39% para o posicionamento por ponto e relativo, respectivamente, em relação ao modelo de Klobuchar. Chen e Gao (2005) compararam o modelo de Klobuchar, os mapas globais do IGS e o modelo de estimativa de atraso ionosférico em que o atraso zenital é estimado utilizando observáveis de código e fase. Os resultados mostraram que a estimativa da ionosfera e o GIM oferecem melhores desempenhos que o modelo de Klobuchar.

Em relação os mapas regionais, Brunini *et al.*, (2008) afirmou que o modelo ionosférico de *La Plata* pode ser aplicado para estudos geofísicos devido à resolução temporal de uma hora e a boa densidade de estações GNSS pertencentes à rede SIRGAS.

Para realizar o PPP com dados de dupla frequência pode-se aplicar a combinação *ion-free* para eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera. Porém, essa observável é mais ruidosa (menos precisa) que as observáveis originais e a ambiguidade da fase deixam ser um número inteiro. Geng *et al.*, (2013) analisou a adição da portadora L5 no PPP em tempo real para soluções rápidas das ambiguidades e observou que utilizando as três portadoras (L1, L2 e L5) a taxa de solução das ambiguidades atinge 99% com 65 segundos de observação, em contraste com a utilização das duas portadoras (L1 e L2), que em 150 segundos, solucionou apenas 64% das ambiguidades.

Em relação à estimativa da ionosfera comparecem desafios, como por exemplo, relacionados ao número de incógnitas e convergência do ajustamento. É necessário estimar um parâmetro para cada satélite relacionado ao ponto ionosférico em cada época considerando a variabilidade estocástica da ionosfera devido às variações diárias e sazonais.

Neste contexto realizou-se a avaliação da acurácia no PPP ao aplicar a correção da ionosfera a partir de diferentes estratégias para dados de simples frequências coletados na região brasileira. Com os resultados obtidos e análises realizadas, este trabalho contribui no avanço das pesquisas relacionadas à modelagem da ionosfera e aplicação no posicionamento geodésico, bem como estudos sobre Clima Espacial no Brasil, o qual é fortemente afetado pelos efeitos da ionosfera.

1.3 Objetivos da Pesquisa

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a acurácia do Posicionamento por Ponto Preciso GPS aplicando as estratégias de correção da ionosfera: modelo de Klobuchar, Mapas Globais da Ionosfera (GIM), Mapas Regionais de La Plata (LPIM) e a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Adaptar o *software* RT_PPP para leitura dos mapas regionais da ionosfera;
- Avaliar a acurácia do posicionamento ao aplicar correções advindas do GIM e LPIM com geração de séries temporais para estações distribuídas no Brasil;
- Avaliar a acurácia do PPP para dados de simples frequência com aplicação da estimativa da ionosfera.

1.4 Justificativa da Pesquisa

No que concerne aos estudos dos efeitos ionosféricos e estratégias de correção da ionosfera no posicionamento geodésico, diversos trabalhos foram desenvolvidos aplicando o modelo de Klobuchar e os mapas globais da ionosfera (KLOBUCHAR 1987, CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2003; SALOMONI, 2008; MACALALAD, 2012), porém poucos estudos foram desenvolvidos quando se trata dos mapas regionais da ionosfera, especialmente quando aplicado para a região brasileira.

Em relação aos mapas globais da ionosfera, estes são estimados a partir de estações do IGS distribuídas globalmente e apresentam pouca cobertura para região brasileira. Neste caso, a interpolação do VTEC pode produzir valores não confiáveis devido à baixa densidade de estações GNSS que fazem parte da estimativa do VTEC. Sendo assim, mapas regionais podem proporcionar resultados mais confiáveis em termos de posicionamento, uma vez que utilizam dados de uma quantidade maior de estações na região em questão.

Outra estratégia de correção da ionosfera é estimar o efeito ionosférico no ajustamento dos dados GPS, contudo, a técnica de estimativa é um desafio, em função da alta variabilidade ionosférica e de fenômenos que ocorrem nas camadas da ionosfera, e que ainda é alvo de investigações da comunidade científica.

É importante ressaltar que o Brasil por estar localizado na região equatorial sofre forte influência dos efeitos ionosféricos, o que requer modelos mais apropriados abrindo um campo de estudos e investigações, relacionada com o tema clima espacial. Essa região do planeta sofre influência da anomalia equatorial e é considerada uma das que apresentam maiores variações temporais e espaciais do TEC, além da ocorrência dos efeitos de cintilação ionosférica (MATSUOKA, 2007; SILVA, 2009).

Nesse sentido a avaliação da acurácia do PPP quando aplicado os modelos de correção da ionosfera para dados GPS coletados na região brasileira, podem proporcionar resultados importante para o tema Clima Espacial e contribuir nos avanços dos modelos regionais e na modelagem da estimativa da ionosfera.

1.5 Conteúdo do Trabalho

Esta pesquisa está dividida em oito capítulos e um anexo, sendo o primeiro capítulo destinado à introdução sobre o assunto, breve contextualização do trabalho, situação atual que se encontra o tema, objetivos e justificativa da pesquisa. O segundo capítulo apresenta uma breve revisão de ajustamento. O terceiro capítulo apresenta uma introdução ao Posicionamento por Ponto Preciso e a modelagem matemática do PPP.

O capítulo 4 é destinado à revisão bibliográfica sobre a ionosfera e os modelos de mitigação dos efeitos ionosféricos, é apresentada a modelagem matemática para a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera. No capítulo 5 é descrita a metodologia da pesquisa, desde os dados GPS utilizados nos experimentos até as etapas de processamento. No capítulo 6 são apresentados os experimentos realizados, resultados e as análises. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros. O ANEXO A apresenta rotina para correção da ionosfera pelo modelo de Klobuchar.

2. INTRODUÇÃO AO AJUSTAMENTO

Nesta seção é realizada a revisão bibliográfica relacionada à introdução ao ajustamento de observação pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), seja em lote ou no modo recursivo.

2.1 Método dos Mínimos Quadrados

Na estimativa de parâmetros envolvendo observáveis GNSS, geralmente se utiliza o Método dos Mínimos Quadrados (M.M.Q.), desenvolvido independentemente por GAUSS (1795) e Legendre (1805) (GEMAEL, 1994).

No M.M.Q. as variáveis incógnitas X (parâmetros) e sua MVC (Matriz de Variância e Covariância) são estimadas a partir das observações realizadas (L_b) e respectivas precisões (GEMAEL, 1994). O M.M.Q. consiste em minimizar a forma quadrática dos resíduos, dada por:

$$\phi = V^T P V = \min \quad (2.1)$$

conhecida como forma quadrática fundamental, onde v é o vetor dos resíduos e P a matriz peso das observações, dada por:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{Lb}^{-1} \quad (2.2)$$

sendo, σ_0^2 o fator de variância a priori e Σ_{Lb} a MVC das observações.

O ajustamento pelo M.M.Q. pode ser realizado aplicando o método paramétrico, dos correlatos (condicionado) ou o combinado. Em geral, no processamento de dados GNSS, o método aplicado é o paramétrico, quer seja em lote (todas as observações são envolvidas no ajustamento) quer seja recursivo (observações são inseridas à medida que se tornam disponíveis) (MONICO, 2008).

No ajustamento pelo M.M.Q., o modelo matemático é composto pelo modelo funcional e modelo estocástico, os quais são indispensáveis e de grande importância no processo de estimação de parâmetros. O modelo funcional descreve as

propriedades determinísticas da realidade física e o modelo estocástico descreve as propriedades não determinísticas (probabilísticas ou estatísticas) das observações, sendo representado na forma de MVC (GEMAEL, 1994; ODIJK, 2002; LEICK, 2004).

O modelo funcional no Método Paramétrico é expresso por (GEMAEL, 1994):

$$L_a = F(X_a) \quad (2.3)$$

em que:

$$L_a = L_b + V \quad (2.4)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (2.5)$$

Onde:

L_a - Vetor das observações ajustadas;

L_b - Vetor das observações;

V - Vetor dos resíduos;

X_0 - Vetor dos parâmetros aproximados;

X - Vetor de correção aos parâmetros aproximados;

X_a - Vetor dos parâmetros ajustados.

O modelo estocástico é representado pela MVC das observações e o modelo funcional linearizado é dado por (TEUNISSEN, 2001):

$$V = L - AX, \text{ com } n > u \quad (2.6)$$

em que:

n - número de equações ou de observações;

u - número de parâmetros incógnitos;

A - Matriz das derivadas parciais ou matriz *design* ou Jacobiana;

$L = L_b - L_0$, sendo $L_0 = F(X_0)$.

O critério do M.M.Q. é minimizar a forma quadrática (equação 2.2). De acordo com esse critério, a solução do ajustamento é dada por (TEUNISSEN, 2001):

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (2.7)$$

$$\Sigma_{\mathbf{Xa}} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (2.8)$$

Sendo, $\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{n - u}$ o fator de variância a posteriori e $n - u$ corresponde aos graus de liberdade do ajustamento.

As MVCs das observações estimadas e dos resíduos são dadas por (GEMAEL, 1994):

$$\Sigma_{\mathbf{La}} = \mathbf{A} \Sigma_{\mathbf{Xa}} \mathbf{A}^T \quad (2.9)$$

$$\Sigma_{\mathbf{V}} = \Sigma_{\mathbf{Lb}} + \Sigma_{\mathbf{La}} \quad (2.10)$$

onde:

$\Sigma_{\mathbf{La}}$ - MVC das observações ajustadas;

$\Sigma_{\mathbf{Xa}}$ - MVC dos parâmetros ajustados;

$\Sigma_{\mathbf{V}}$ - MVC dos resíduos.

O estimador $\hat{\mathbf{X}}$ de $\mathbf{X}$ (parâmetros incógnitos) é dito imparcial ou não tendencioso se a esperança matemática deles for igual, o que ocorre quando a esperança matemática do vetor dos resíduos é igual a zero.

2.2 Ajustamento Recursivo pelo MMQ

O ajustamento das observações coletadas pelos receptores GNSS é realizado, em geral, na forma recursiva, haja vista o número de observações coletadas em determinado espaço de tempo (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008; HOFFMAN WELLENHOF et al., 2001; MARQUES, 2012).

No ajustamento recursivo pelo MMQ, os parâmetros incógnitos são atualizados com a inserção de novas observações sem a necessidade de armazenar as observações anteriores. Porém ao iniciar o ajustamento é preciso obter a estimativa inicial para o vetor dos parâmetros ou vetor estado, e de sua MVC. No caso de processamento de dados GPS esses parâmetros iniciais podem ser

calculados através do ajustamento convencional utilizando-se a quantidade mínima de dados necessário das primeiras épocas (MONICO, 2008).

Uma forma de se realizar o ajustamento recursivo pelo MMQ é seguindo as etapas (TEUNISSEN, 2001):

- Inicialização:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_0^a = (\mathbf{A}_0^t \Sigma_{L_0^b}^{-1} \mathbf{A}_0)^{-1} (\mathbf{A}_0^t \Sigma_{L_0^b}^{-1} \mathbf{L}_0^b) \\ \Sigma_{\mathbf{X}}^{a-1} = (\mathbf{A}_0^t \Sigma_{L_0^b}^{-1} \mathbf{A}_0) \end{cases} \quad (2.11)$$

- Atualização do vetor dos parâmetros:

$$\mathbf{X}_K^a = \mathbf{X}_{K-1}^a + \mathbf{K}_K \mathbf{V}_K \quad (2.12)$$

onde, para $K=1,2,\dots$ relacionado com o números de épocas.

$\mathbf{X}_{K-1}^a$ - vetor dos parâmetros na época k-1;

$\mathbf{K}_K$ - matriz de ganho de Kalman;

$\mathbf{V}_K$ - vetor do resíduo predito (diferença entre a observação atual e a predição).

A matriz $\mathbf{K}_K$ e o resíduo $\mathbf{V}_K$ são dados pelas equações (2.13) e (2.14):

$$\mathbf{K}_K = \Sigma_{\mathbf{X}}^a \mathbf{A}_K^T \Sigma_{\mathbf{V}_K}^{-1} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{V}_K = \mathbf{L}_K^b - \mathbf{A}_K \mathbf{X}_{K-1}^a \quad (2.14)$$

$$\Sigma_{\mathbf{V}_K}^{-1} = \Sigma_{\mathbf{X}}^a + \mathbf{A}_K \Sigma_{\mathbf{X}_{K-1}}^a \mathbf{A}_K^T \quad (2.15)$$

Onde:

$\Sigma_{\mathbf{X}_{K-1}}^a$ - MVC dos parâmetros incógnitos na época k-1;

$\mathbf{A}_K$ - matriz *design* calculada com as novas observações na época k;

$\Sigma_{\mathbf{V}_K}$ - MVC dos resíduos na época k;

$\mathbf{L}_K^b$ - vetor das novas observações.

Atualização da MVC dos parâmetros ajustamentos para época atual:

$$\Sigma x_k^a = (I - K_k A_k) \Sigma_{K-1}^a \quad (2.16)$$

O processo recursivo é inicializado a partir do cálculo da primeira estimativa pelo MMQ padrão, sendo assim a estimativa atual pode ser obtida a partir da estimativa anterior e da observação atual, usando o mesmo procedimento descrito acima.

No ajustamento recursivo processos aleatórios podem ser aplicados, onde se pode destacar o processo aleatório *random walk* (caminhos aleatórios) que é resultante da integração de sinais independentes estatisticamente e o *white noise* (ruído branco) que indica que há não correlação de uma época para outra e a MVC requer a reinicialização ao final de cada etapa da estimativa do parâmetro estocástico (MARQUES,2008).

Com base no ajustamento recursivo podem-se derivar as equações do filtro de Kalman que pode envolver as etapas de predição, filtragem e suavização. Descrição detalhada sobre o assunto pode ser encontrada em Gelb et al. (1974), Camargo (1999), Teunissen (2001).

3. POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) surgiu no início dos anos 90, como sendo um método que proporciona acurácia comparável com as obtidas pelos métodos de posicionamento relativo, porém com a vantagem de utilizar apenas um receptor ao nível de usuário. A disponibilidade de órbitas precisas e correção do erro do relógio dos satélites com precisão possibilitou a evolução deste método. Devido ao método utilizar apenas um receptor, os erros envolvidos com as observáveis devem ser adequadamente modelados para a obtenção de coordenadas com boa qualidade. Este método consiste na obtenção da posição da antena do receptor (simples ou dupla frequência) utilizando observáveis de código e fase da onda portadora e a correção de praticamente todos os efeitos sistemáticos envolvido nas medidas (MONICO, 2008; MARQUES, 2012).

Em relação às órbitas dos satélites, atualmente o IGS, produz três tipos de efemérides, denominadas de IGU (órbitas ultrarrápidas), IGR (órbitas rápidas) e IGS (órbitas finais) (MONICO, 2008). A Tabela 1 apresenta a acurácia, a latência e outras informações relacionadas aos produtos do IGS.

Tabela 1 – Acurácia e latência dos produtos IGS.

Produtos IGS		Acurácia	Latência	Atualização	Intervalo Amostral dos dados
Transmitidas pelos satélites	Órbita	~100 cm	Tempo Real	...	Diária
	Relógio	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultrarrápidas (IGU Predita)	Órbita	~5 cm	Tempo Real	03,09,15,21 UTC	15 min
	Relógio	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultrarrápidas (IGU observada)	Órbita	~3 cm	3 – 9 horas	03,09,15,21 UTC	15 min
	Relógio	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rápida (IGR)	Órbita	~2.5 cm	17 – 41 horas	17 UTC Diária	15 min
	Relógio	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final (IGS)	Órbita	~2.5 cm	12 – 18 dias	Semanal	15 min
	Relógio	~75 ps RMS ~20 ps SDev			5 min/ 30 seg

Fonte: IGS (2014).

O PPP possui algumas vantagens em relação ao posicionamento relativo, visto que este método não requer o acesso de uma ou mais estações de referência com

coordenadas conhecidas durante o posicionamento, o que proporciona a redução de receptores nos trabalhos de campo (GAO *et al.*, 2006). Contudo, o PPP acaba sendo dependente de uma rede de estações GNSS distribuídas globalmente, uma vez que as órbitas, correções de relógios dos satélites, os mapas de correção dos efeitos ionosféricos e outros parâmetros são estimados a partir de dados coletados na rede.

Por ser independente do comprimento das linhas de bases, atualmente o PPP vem sendo utilizado e estudado com maior frequência na comunidade geodésica, principalmente a aplicação do PPP em tempo real, o que começou com o projeto-piloto do IGS em meados do ano de 2007 (IGS-RTPPP, 2014).

O desempenho do PPP tem sido demonstrado ao longo dos últimos anos por diversos autores, podendo-se citar trabalhos como: Monico (2008); Marques (2008 e 2012); Li (2012); Geng *et al.* (2011 e 2013), além do surgimento dos serviços *online* de processamento PPP, como: PPP do *Natural Resources Canadá* (NRCan), *GPS Analysis and Positioning Software* (GAPS) da *Universidad New Brunswick*, *Automatic Precise Positioning Service* (APPS) do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), entre outros. No âmbito nacional, o IBGE disponibiliza um serviço *online* gratuito para o pós-processamento de dados GNSS no método PPP denominado IBGE-PPP, esse serviço faz uso do programa CSRS-PPP desenvolvido pelo NRCan. (IBGE, 2014).

No caso deste trabalho, o modelo matemático a ser apresentado se refere ao caso do GPS. A próxima seção apresenta o modelo matemático funcional e estocástico do PPP para aplicação no ajustamento.

3.1 Modelo Funcional e Estocástico do PPP

O modelo matemático funcional e estocástico para o ajustamento de medidas GPS é amplamente divulgado na literatura podendo se citar Seeber (2003); Leick (2004); Monico (2008) e Hoffman Wellenhof *et al.* (2001).

A pseudodistância é a medida de distância entre o satélite e a antena do receptor, definidas pelas épocas de emissão e recepção do sinal. Essa medida é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de

transmissão (t^t) e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção (t_r). A equação da pseudodistância entre o satélite (s) e o receptor (r) considerando os diversos efeitos sistemáticos envolvidos na propagação do sinal é apresentada a seguir (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008):

$$PD_{rLi}^{s_i} = \rho_r^{s_i} + c(dt_r - dt^{s_i}) + I_{rLi}^{s_i} + T_r^{s_i} + dm_r^{s_i} + Orb^{s_i} + b_r + b^{s_i} + v_{PD_r^{s_i}} \quad (3.1)$$

onde:

L_i - se refere a banda de transmissão ($i=1, 2, 5$)

ρ_r^s - Distância geométrica entre o satélite (s_i) no instante de transmissão e receptor (r) no instante de recepção do sinal;

c - Velocidade da luz no vácuo;

dt_r e dt^s - Erros dos relógios do receptor e satélite, respectivamente;

I_{rLi}^s - Atraso provocado pela ionosfera na frequência $L1$;

T_r^s - Atraso provocado pela troposfera;

dm_r^s - Efeito de multicaminho;

Orb^s - Erro da órbita do satélite;

b_r e b^s - Atrasos de *hardware* para o receptor e satélite, respectivamente,

$v_{PD_r^s}$ - Erros aleatórios e não modelados da pseudodistância.

A medida da fase da onda portadora é obtida a partir da diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor (Φ^s), e a fase do sinal gerada pelo receptor (Φ_r), no instante de recepção do sinal. No processo de medida é obtida apenas uma parte fracionária da onda portadora, restando um número inteiro de ciclos desconhecido, denominado de ambiguidade (N). A equação da fase da onda portadora (em ciclos) considerando os efeitos sistemáticos envolvidos com a propagação do sinal é apresentada a seguir (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008):

$$\varphi_{rLi}^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_{rLi}^s + T_r^s + dm_r^s + Orb_r^s + b_r + b^s}{c} \right) + f_{Li} (dt_r - dt^s) + (\varphi_t^s(t_0) - \varphi_r(t_0)) + N_{rLi}^s + v_{\varphi_r^s} \quad (3.2)$$

onde:

f_{Li} – Frequência de transmissão do sinal L_i ;

$\phi_t^s(t_0)$ e $\phi_r(t_0)$ - Fases iniciais no satélite e no receptor, respectivamente, no instante t_0 ;

N_{rLi}^s – Ambiguidade no instante inicial de rastreo;

$v_{\phi_r^s}$ – Erros aleatórios e não modelados da fase da onda portadora.

Os outros termos na equação da fase portadora já foram mencionados anteriormente, lembrando que a medida da fase é mais precisa que a do código. As observáveis GNSS são passíveis de erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros aleatórios são inerentes às medidas e os erros sistemáticos podem ser modelados e/ou minimizados, seja a partir de técnicas de rastreo, aplicação de modelos matemáticos para correção dos efeitos sistemáticos ou a estimativa dos mesmos. Os erros grosseiros devem ser detectados e eliminados. O tratamento matemático dos efeitos sistemáticos envolvidos nas equações de observação e as técnicas adequadas para minimizá-los, podem ser encontrados na literatura especializada sobre geodésia espacial, como por exemplo, em Seeber (2003), Leick (2004), Monico (2008), entre outros.

As fontes dos efeitos sistemáticos podem estar relacionadas com os satélites e receptores, com a propagação do sinal na atmosfera ou relacionadas com efeitos geodinâmicos que afetam as estações.

Tabela 2 – Fontes de erros e efeitos no GNSS.

Fontes	Efeitos
Satélites	Erro da órbita, erro do relógio, relatividade, atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite e centro de fase da antena do satélite.
Propagação do Sinal	Refração troposférica, refração ionosférica, perdas de ciclos, multicaminho e rotação da Terra.
Receptor e Antena/ Estação	Erro do relógio, atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor, centro de fase da antena do receptor, multicaminho, marés terrestres, carga de marés oceânicas, movimento do polo e carga atmosférica.

Fonte: Adaptada de MONICO, 2008.

O erro do relógio do satélite é causado pelo não sincronismo com o sistema de tempo GPS, sendo esse erro predito e enviado aos satélites pelo centro de controle para que sejam transmitidos aos usuários nas mensagens de navegação. Além disto, o IGS disponibiliza as correções precisas de relógios estimadas com taxa amostral de 30 segundos e correção de órbita com taxa de 15 minutos e acurácia de 2,5 cm, como apresentado na Tabela 1.

O atraso de *hardware*, seja no satélite ou no receptor, é causado pela diferença entre os caminhos percorridos pelas portadoras L1 e L2 no *hardware*. Os atrasos (bias instrumentais) Bc1, Bp1 e Bp2 são relacionados, respectivamente aos códigos C1, P1 e P2. Com a modernização do GPS, os novos satélites transmitem o novo código L2C na L2 onde comparece o atraso Bc2 e o mesmo ocorre com o código L5C presente no novo sinal L5 transmitido pelo GPS. Estes atrasos não são acessíveis diretamente em sua forma absoluta, ou seja, eles são obtidos quando se faz combinações entre as portadoras (forma relativa). Desta maneira, os atrasos ou bias são denominados de DCB (*Differential Code Bias*) e, para o caso envolvendo dados nas portadoras L1 e L2, são designados como: Bp1-p2, Bp1-c1 e Bp2-c2 (DACH et al., 2007; LEANDRO, 2009). No caso do *hardware* dos satélites, a magnitude desse atraso é determinada durante o processo de calibração dos satélites antes do seu lançamento e é conhecida como TGD (*Timing Group Delay*), cujos valores para cada satélite fazem parte das mensagens de navegação

(WILSON et al., 1999). O valor de B_{p1-p2} pode ser relacionado com o atraso de grupo TGD da seguinte forma:

$$TGD = -1,5457B_{p1-p2} + B_0, \quad (3.3)$$

onde, B_0 é um valor arbitrário irrelevante para muitas aplicações, como, por exemplo, aplicado em Dach et al., 2007.

O efeito da troposfera pode ser corrigido a partir de modelos matemáticos, como por exemplo, modelos de Hopfield e de Saastamoinen ou a partir de modelos advindos de dados de PNT (Previsão Numérica do Tempo) (SAPUCCI, 2005). Além disto, tem-se a opção de estimar a componente úmida da troposfera (Z_{wd}), a qual, geralmente é tratada como um processo estocástico do tipo *random walk* no ajustamento recursivo dos dados GPS.

A órbita do satélite pode ser calculada a partir das efemérides transmitidas (mensagens de navegação) ou das precisas disponibilizadas, por exemplo, pelo IGS. O efeito da ionosfera, objeto de avaliação deste trabalho, pode ser corrigido a partir de modelos matemáticos ou fazendo uso de mapas globais ou regionais da ionosfera ou aplicação da ion-free para o caso de dados em duas frequências. Dessa forma, os parâmetros incógnitos envolvidos na Equação 3.1e 3.2 são as coordenadas da estação, erro do relógio do receptor, atraso troposférico e as ambiguidades. A distância geométrica entre o receptor e o satélite (no instante de transmissão – t^i) é calculada por:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s(t^i) - X_r)^2 + (Y^s(t^i) - Y_r)^2 + (Z^s(t^i) - Z_r)^2} \quad (3.4)$$

A linearização por série de Taylor da equação de pseudodistância e de fase (Equação 3.1 e 3.2), considerando o receptor (r) e o satélite (s_i) pode ser escrita da seguinte forma (MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$E\{\Delta PD_{r Li}^{s_i}\} = -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta X_r - \frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Y_r - \frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Z_r + c(cdt_r) + Mf Z_{wd}$$

(3.5)

$$E\{\Delta\phi_{r\ Li}^{s_i}\} = -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta X_r - \frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Y_r - \frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Z_r + c(cdt_r) + Mf Zwd + \lambda_{Li} N_{Li}$$

Na equação 3.5, $E\{\cdot\}$ representa o operador esperança matemática; $\Delta PD_{r\ Li}^{s_i}$ é a diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para pseudodistância); $\Delta\phi_{r\ Li}^{s_i}$ é a diferença entre a fase observada e a calculada (vetor L para a fase); $(\rho_r^{s_i})^0$ é distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados. Os termos $(\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, dt_r, Zwd$ e $N_{Li})$ são as correções aos parâmetros incógnitos, ou seja, as coordenadas da estação, erro do relógio do receptor, componente úmida da troposfera e as ambiguidades. A Equação 3.6 linearizada na forma matricial $E\{L\} = AX$ (considerado $E\{V\}=0$, sendo V o vetor de resíduos) pode ser escrita como:

$$E\left\{\begin{bmatrix} \Delta PD_{r\ Li}^{s_i} \\ \Delta\phi_{r\ Li}^{s_i} \end{bmatrix}\right\} = AX = \begin{bmatrix} -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & 0 \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & \lambda_{Li} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ Zwd \\ N_{r\ Li}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Onde:

$E\{\cdot\}$ - representa o operador de esperança matemática;

$\Delta PD_{L1r}^{s_i}$ - diferença entre a pseudodistância observada e a calculada;

$\Delta\phi_{L1r}^{s_i}$ - diferença entre a fase observada e a calculada;

$-\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0}$ - derivada parcial da distância geométrica com relação à coordenada X;

$-\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0}$ - derivada parcial da distância geométrica com relação à coordenada Y;

$-\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0}$ - derivada parcial da distância geométrica com relação à coordenada Z;

Mf - função de mapeamento para o efeito da troposfera (componente úmida);

λ_{L_i} ($i=1$ e 2) - comprimento de onda na frequência L1 e L2;

ΔX_r , ΔY_r e ΔZ_r - correções das coordenadas aproximadas do receptor;

cdt_r - parâmetro incógnito relativo ao erro do relógio do receptor;

Zwd - parâmetro incógnito do atraso troposférico úmido na direção zenital;

$N_{L1}^{S_i}$ - ambiguidade na portadora L1.

O modelo estocástico para o caso do posicionamento absoluto é composto pela MVC (Matriz de Variância e Covariância) de L_b , geralmente, na forma diagonal. Nesse caso assume-se que as medidas de fase da onda portadora ou pseudodistâncias tem diferentes variâncias e são estatisticamente independentes.

$$\Sigma_{L_b} = \begin{bmatrix} \sigma_{PD_{L1}^{S_1}}^2 & & & & & & 0 \\ & \sigma_{PD_{L1}^{S_2}}^2 & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & \sigma_{PD_{L1}^{S_n}}^2 & & & \\ & & & & \sigma_{\phi_{L1}^{S_n}}^2 & & \\ & & & & & \sigma_{\phi_{L1}^{S_2}}^2 & \\ & & & & & & \ddots \\ 0 & & & & & & & \sigma_{\phi_{L1}^{S_n}}^2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Estratégias de ponderação em função do ângulo de elevação do satélite (elev) podem ser adotadas tais como descritas por Silva (2009). No caso deste trabalho considera-se o valor da precisão da medida adotada pelo usuário, a qual é ponderada pela função inverso do seno do ângulo de elevação do satélite. Outra estratégia adotada consiste em considerar de forma adicional a precisão da ionosfera calculada a partir do VTEC interpolado, seja do mapa regional ou global. Dessa forma a variância da pseudodistância ($\sigma_{PD_{L1}^{S_i}}$) é representada por:

$$\sigma_{PD_{L1}^{S_i}}^2 = \frac{1}{\text{sen}(\text{elev})} \sigma_{C/A}^2 + \sigma_{\text{IONO}}^2 \quad (3.8)$$

Onde: $\sigma_{\text{IONO}}^2 = (\sigma_{\text{VTEC}} * \text{IonoMF})^2$. Na equação 3.8, $\sigma_{\text{c/a}}^2$ é a variância do código C/A calculada em função do valor da precisão adotada pelo usuário; σ_{IONO}^2 é a variância da ionosfera calculada em função da incerteza do VTEC (σ_{VTEC}) obtido a partir do mapa ionosférico, o qual é mapeado para a direção receptor satélite através da função de mapeamento IonoMF (ver seção 4.3). O valor de σ_{VTEC} pode ser obtido com base em valores divulgados pelo órgão gerador do mapa ou a partir de valores disponibilizados no próprio mapa, os quais nem sempre estão disponíveis. Experimentos foram realizados neste trabalho visando avaliar os valores a serem adotados de precisão para a utilização de mapas regionais e mapas globais da ionosfera no PPP.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DA IONOSFERA NO POSICIONAMENTO

4.1 Introdução à Ionosfera

Para fins de posicionamento geodésico, a atmosfera terrestre pode ser dividida em função da propagação de ondas eletromagnéticas, em troposfera e ionosfera (SEEBER, 2003). A troposfera é a camada compreendida entre a superfície terrestre até aproximadamente 50 km de altura. Ela é formada por partículas neutras, e a maior concentração de gases encontra-se até uma altura de 12 km. A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo total do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura e a refração independe da frequência do sinal transmitido, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz (LEICK, 1995; SAPUCCI, 2005). A ionosfera ao contrário da troposfera é um meio dispersivo, ou seja, neste meio a propagação de sinais depende da frequência. Caracteriza-se, como uma camada ionizada formada por uma grande quantidade de íons e elétrons livres. Inicia-se por volta de 50 km e estende-se até, aproximadamente, 1.000 km de altura (MATSUOKA, 2003). Na região compreendida pela ionosfera, a densidade de elétrons livres é suficiente para alterar a propagação de ondas eletromagnéticas, tais como as transmitidas pelos satélites GNSS.

A radiação solar é a principal responsável pelo processo de formação da ionosfera. O processo de fotoionização é responsável pela produção de uma grande quantidade de íons e elétrons livres. Além disso, o Sol libera um fluxo contínuo de partículas eletricamente carregadas (ventos solares), que contribui para sua formação (MATSUOKA, 2003).

Na ionosfera ocorrem dois processos que dependem da hora do dia: a ionização que ocorre em altas altitudes, onde os átomos se encontram distantes uns dos outros e os gases se mantêm ionizados durante horas; e a recombinação, que ocorre em altitudes menores de forma rápida. Durante o dia o processo de ionização tem efeito maior que a recombinação, devido à presença da radiação solar. Neste período, as camadas ionizadas atingem máxima densidade de elétrons e tem maior influência nas ondas de rádio. No entanto, ao anoitecer o processo se inverte e a recombinação se torna maior, causando diminuição da densidade de elétrons (VERONEZ, 2004).

A ionosfera por ser um meio dispersivo, faz com que o código e a fase transmitida pelos satélites GNSS sofram, respectivamente, um retardo e um avanço, o que, por sua vez, provoca um erro na distância medida entre o satélite e o receptor. O efeito de primeira ordem da ionosfera é diretamente proporcional ao TEC presente ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal transmitido (equações 4.1 e 4.2). Portanto, pode-se concluir que as frequências mais altas são as menos afetadas pela ionosfera (MATSUOKA, 2003), logo a portadora da frequência L2 sofre maior influência da ionosfera do que a portadora L1. O erro ionosférico de primeira ordem na fase e no código tem a mesma magnitude, porém com sinais contrários, sendo representados, respectivamente, por:

$$I_{L1f_r}^1 = -\frac{40,3}{f_{L1}^2} \text{TEC} \quad (4.1)$$

$$I_{L1g_r}^1 = \frac{40,3}{f_{L1}^2} \text{TEC} \quad (4.2)$$

A partir das equações (4.1 e 4.2) pode-se calcular a quantidade em metros do efeito da ionosfera para as frequências L1 e L2, inserindo apenas a quantidade de TEC que afetou o sinal para um determinado satélite numa determinada época.

O TEC varia irregularmente no tempo e no espaço, apresentando três ciclos principais (MATSUOKA, 2007): diurnos, sazonais e de longos períodos, influenciando diretamente na mudança de densidade de elétrons na camada ionosférica.

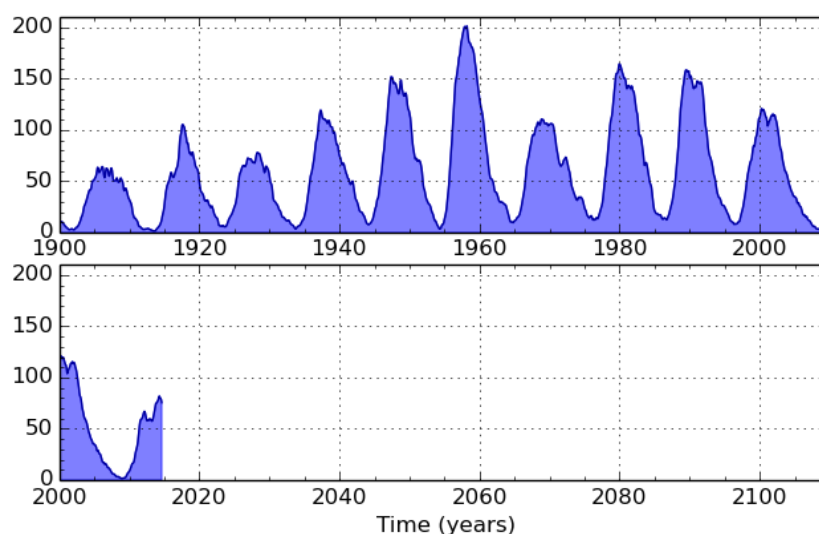
As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera e são devidas ao fluxo de ionização solar, fazendo com que essas regiões desapareçam à noite devido à recombinação e junção dos elétrons e íons. Sendo que o máximo da variação diurna é em torno das 14 horas locais e o mínimo em torno das 5 horas locais (MATSUOKA, 2007).

A variação sazonal está relacionada com a inclinação dos raios solares, resultante do movimento de translação da Terra em torno do Sol, o que proporciona diferentes graus de ionização da ionosfera durante as 4 estações do ano. Os valores máximos da densidade de elétrons no hemisfério Sul ocorrem aproximadamente nos

meses de março/abril e setembro/outubro coincidindo, respectivamente, aos equinócios de outono e primavera. Já os valores mínimos ocorrem nos solstícios de inverno (junho/julho) (FONSECA JUNIOR, 2002).

Em relação às variações do ciclo de longos períodos é importante ressaltar que o aumento do valor do TEC é proporcional ao aumento do número de manchas solares, os quais obedecem a um período de aproximadamente 11 anos, que é o tempo regular entre os picos de mínimo e o máximo de manchas solares. Atualmente encontra-se em atividade o ciclo solar de número 24. A Figura 1 ilustra o histórico do número médio mensal de manchas solares no período de 1900 a 2014:

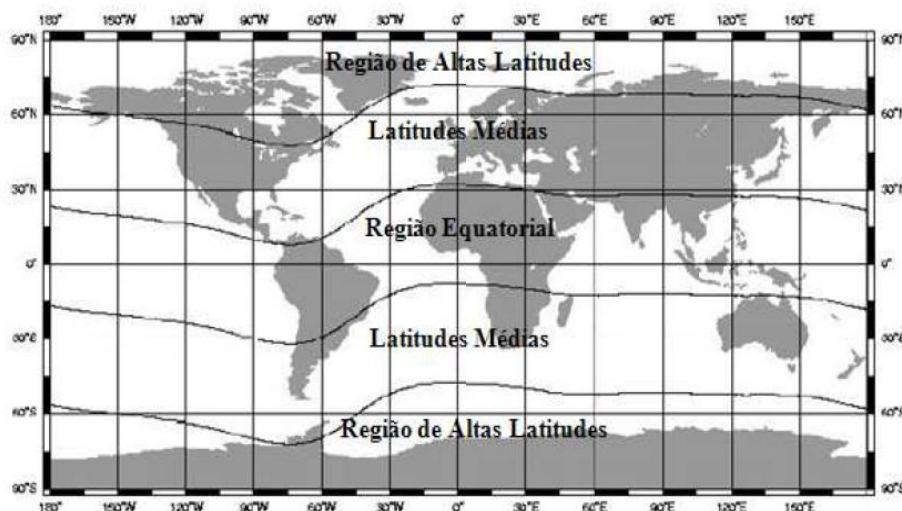
Figura 1 – Histórico do número de manchas solares (ciclos solares).



Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html> (Acesso em março de 2015).

Em relação à variação geográfica, o Brasil está localizado na região geomagnética equatorial, sendo essa região dividida em equatorial propriamente dita, situada entre o equador e $\pm 5^\circ$ (norte/sul) e de baixas latitudes, entre $\pm 15^\circ$ a $\pm 20^\circ$ (norte/sul) (MATSUOKA, 2007). As localizações aproximadas são definidas como mostra a Figura 2 (FONSECA JÚNIOR, 2002).

Figura 2 – Regiões geográficas da ionosfera.



Fonte: FONSECA JUNIOR, 2002.

A região de médias latitudes está localizada entre as regiões de alta latitude e a equatorial, sendo que nesta região a ionosfera sofre menos variação do que as outras regiões, tendo um comportamento regular, normalmente livre de irregularidades e que mais se aproxima dos modelos ionosféricos clássicos (FONSECA JUNIOR, 2002; MATSUOKA, 2003; 2007).

A região equatorial onde está localizado o Brasil contém os maiores valores de densidade de elétrons, principalmente no início da tarde e é nesta região que ocorrem dois fenômenos que afetam a propagação do sinal GNSS: a Cintilação Ionosférica (CI), que causa interferência a ponto de provocar a perda do sinal, e a Anomalia Equatorial, que provoca variações espaciais do TEC afetando a qualidade do posicionamento GNSS.

A Cintilação Ionosférica provoca variações na pseudodistância e na fase da onda portadora, quando o sinal passa através de uma pequena região de plasma de densidade de elétrons irregular na camada da ionosfera (DAVIES, 1990 *apud* SILVA, 2009; CONKER *et al.*, 2002 *apud* SILVA, 2009). Na região onde está localizado o Brasil, a ocorrência da cintilação está relacionada diretamente com a anomalia equatorial, podendo ser provocada também pela ocorrência de bolhas ionosféricas. A ocorrência da cintilação aumenta durante períodos de alta atividade solar e outras atividades extremas tais como a ocorrência de tempestades geomagnéticas.

4.2 Modelos de Correção da Ionosfera

Dentre os modelos pesquisados e utilizados na correção dos efeitos ionosféricos no posicionamento geodésico, pode-se citar a correção a partir do modelo matemático de Klobuchar e a aplicação dos mapas globais e regionais da ionosfera para dados de simples frequência. Pode-se aplicar também a estimativa do efeito residual da ionosfera, apresentada de forma detalhada na seção 5. Para dados de dupla frequência pode-se aplicar a combinação linear *ion-free* que será descrita na próxima seção.

4.2.1 Combinação Linear Livre da Ionosfera (*ion-free*)

Os efeitos da ionosfera são divididos em efeitos de primeira, segunda e terceira ordem, sendo o de primeira ordem relacionado apenas com o valor do TEC na camada da ionosfera, o de segunda relacionado com o valor do TEC e do campo geomagnético e o de terceira está relacionado com a máxima densidade de elétrons (MARQUES, 2008). O efeito de primeira ordem correspondente 99% do efeito total da ionosfera, restando os efeitos de segunda e terceira ordem. (ODIJK, 2002). A Tabela 3 apresenta o erro máximo em metros que pode ser esperado para as observáveis GPS, quando o sinal atravessa a camada da ionosfera no sentido inclinado (receptor/satélite).

Tabela 3 - Erro máximo da ionosfera em metros no sentido vertical.

Frequência	1ª ordem ($1/f^2$)	2ª ordem ($1/f^3$)	3ª ordem ($1/f^4$)
L1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L2	53,5 m	0,076 m	0,007 m

Fonte: Seeber, 2003.

A combinação *ion-free* é aplicada para dados coletados em duas frequências. As portadoras L1 e L2 no caso do GPS sofrem diferentes atrasos ao atravessarem a camada da ionosfera. A equação da fase, considerando apenas os efeitos de primeira ordem da ionosfera pode ser escrita como (GOAD, 1996 apud SILVA, 2009; MARQUES, 2012):

$$\varphi_{rLi}^s(t) = \frac{f_{Li}}{c} p' + (\varphi_{tLi}^s(t_0) - \varphi_{rLi}^s(t_0)) + N_{rLi}^s - \frac{I_{rLi}^{s(1)}}{f_{Li}} \quad (4.3)$$

onde:

$i = 1, 2$ (relacionada com a portadora);

P' = distância geométrica entre o satélite e o receptor, acrescida dos efeitos não dispersivos;

$I_{rLi}^{s(1)}$ - efeitos de primeira ordem da ionosfera.

A combinação *ion-free*, para o caso da fase é obtida utilizando os coeficientes m_1 e m_2 que são coeficientes multiplicadores da combinação, juntamente com as observáveis φ_{rL1}^s e φ_{rL2}^s , relacionadas com as frequências $L1$ e $L2$, respectivamente:

$$\varphi_{IF} = m_1 \varphi_{rL1}^s + m_2 \varphi_{rL2}^s \quad (4.4)$$

Para que os efeitos de primeira ordem da ionosfera sejam eliminados as condições (4.5) e (4.6) devem ser satisfeitas (GOAD, 1996 apud SILVA, 2009; MARQUES, 2012):

$$m_1 I_{rL1}^{s(1)} + m_2 I_{rL2}^{s(1)} = 0 \quad (4.5)$$

$$m_1 f_{L1} + m_2 f_{L2} = f_{L1} \quad (4.6)$$

Na equação (4.5) uma condição é imposta, onde se deve encontrar uma combinação que cancele os efeitos da ionosfera (MONICO, 2008). Na equação (4.6) a condição é obtida quando a frequência da combinação *ion-free* é igual à frequência do sinal $L1$, (GOAD, 1996 apud MARQUES, 2012):

Aplicando as condições das equações (4.5) e (4.6), os coeficientes m_1 e m_2 no caso da fase ficam, respectivamente, da seguinte forma: (SEEBER, 2003 p.311).

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cong 2,5457 \\ m_2 &= \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \cong -1,9837 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Para o caso da pseudodistância, o índice m_1 é adotado igual ao da fase e a partir do índice m_1 obtém-se o índice m_2 , os quais são dados por:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad 2,5457 \\ m_2 &= \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad -1,545 \end{aligned} \quad (4.8)$$

A aplicação dos coeficientes das equações (4.7) e (4.8), respectivamente, para as equações de fase e pseudodistância permite eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Porém, a combinação *ion-free* tem como desvantagem o realce do nível de ruído de outros efeitos, tais como os de multicaminho. Além disto, os coeficientes adotados para a eliminação da ionosfera não são números inteiros e fazem com que a ambiguidade da fase resultante da combinação, deixe de ser um número inteiro (LEICK, 1995; MARQUES, 2008). Uma solução para tal problema é o uso das medidas GNSS sem combinações, porém considerando o efeito ionosférico como um parâmetro incógnito. É necessário levar em consideração que os sistemas de posicionamento atualmente passam por um processo de modernização, onde já se tem satélites GPS transmitindo os novos sinais civis, tal como o código civil na portadora L2 (L2C), produzindo uma pseudodistância mais acurada, além da portadora L5, com observáveis de fase e pseudodistância. Desta forma, os efeitos ionosféricos podem ser estimados levando em consideração essas observáveis sem combinação (MARQUES et al., 2013).

Para o caso de dados coletados em receptores de simples frequência pode-se fazer uso do modelo de Klobuchar ou dos mapas globais e regionais ou aplicar a estimativa da ionosfera, os quais são apresentados nas próximas seções.

4.2.2 Modelo de Klobuchar

Uma das alternativas de minimizar o erro devido à ionosfera nas observáveis GPS para usuários de receptores de uma frequência é fazer uso de algum modelo matemático de correção da ionosfera. Um modelo conhecido e aplicado é o modelo de Klobuchar que foi desenvolvido por Klobuchar (1987).

Este modelo é de fácil utilização e seus coeficientes são transmitidos com os sinais GPS. Permite calcular o atraso ionosférico na portadora L1 entre o satélite e a antena receptora. Por utilizar uma rede global de estações GPS e ser um modelo de correção válido para qualquer usuário GPS, o modelo de Klobuchar é considerado um modelo global. Os coeficientes do modelo, num total de oito (α_i e β_i , $i = 0, \dots, 3$), são calculados periodicamente a partir de uma rede global de estações GPS e transmitidos pelos satélites, como parte das mensagens de navegação (HOFMANN-WELLENHOF, 1998).

O modelo de Klobuchar permite corrigir aproximadamente 50 a 60% do erro ionosférico. Este modelo representa o comportamento ideal suavizado da ionosfera, porém não modela flutuações diárias, obtendo melhor desempenho na região geográfica da ionosfera de médias latitudes que varia de 30° a 60° a norte ou a sul da linha do Equador (KLOBUCHAR, 1987 apud MATSUOKA, 2003).

Matsuoka e Camargo (2002) realizaram experimentos na região brasileira próxima ao pico da anomalia equatorial de ionização em um período de alta atividade solar e como resultado eles obtiveram uma melhora média de 53% nos resultados do posicionamento por ponto utilizando o modelo de Klobuchar.

Para utilizar este modelo, é necessário conhecer a latitude e longitude geodésicas aproximadas do local da observação, o ângulo de elevação e azimute de cada satélite em relação à antena do receptor e os coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação.

As etapas para o cálculo do atraso ionosférico por meio deste modelo podem ser vistas no Anexo A.

4.2.3 Mapas Globais da Ionosfera

No ano de 1998 o IGS, a partir de seu grupo de trabalho da ionosfera, iniciou a produção de mapas globais que disponibilizam valores de VTEC calculados usando dados GNSS coletados pela sua rede de receptores (MATSUOKA, 2007). Os mapas ionosféricos vêm sendo produzidos, atualmente, por quatro centros de análise juntamente com o IGS: o CODE, ESA, JPL e o UPC. O centro da UPC é responsável por calcular o GIM final do IGS, que resulta em uma solução única contendo os mapas com a estimativa de VTEC calculado individualmente por cada centro de análise (BRUNINI *et al.*, 2008).

Os Mapas Globais da Ionosfera do IGS são produzidos e disponibilizados em formato IONEX com valores de VTEC distribuídos em uma grade bidimensional de resolução espacial $5^\circ \times 2,5^\circ$ em longitude e latitude, respectivamente. A resolução temporal de cada mapa é de 2 horas e as grades são distribuídas de $87,5^\circ$ (Norte) até $87,5^\circ$ (Sul) em latitude e de 180° (Oeste) a 180° (Leste) em longitude, considerando a altura da camada infinitesimal da ionosfera, em geral, igual a 450 km. Além dos valores de VTEC, o GIM fornece os atrasos de *hardware* (DCB) para o código P1-P2 e P1-C1 dos satélites e receptores envolvidos. Estes mapas podem ser obtidos no endereço eletrônico <ftp://ftp.unibe.ch/aiub> (acesso em Maio de 2015) (SCHAER, 1999; LIU, 2001; IGS, 2015).

A precisão do VTEC disponível no GIM varia em função da região do globo, do número de estações GNSS utilizadas, do período em que os dados (alta ou baixa atividade ionosférica) se encontram, dentre outros fatores. O intervalo divulgado de variação da precisão do VTEC é de 2 a 8 TECU (CODE, 2014; VAN BREE *et al.*, 2012). No caso da região brasileira, verifica-se a partir dos arquivos GIM que dados de oito estações da rede IGS fazem parte da estimativa do VTEC, sendo elas: BRAZ (Brasília), BRFT (Eusébio), CHPI (Cachoeira Paulista), POVE (Porto Velho), RECF (Recife), SALU (São Luís), SAVO (Salvador) e UFPR (Curitiba).

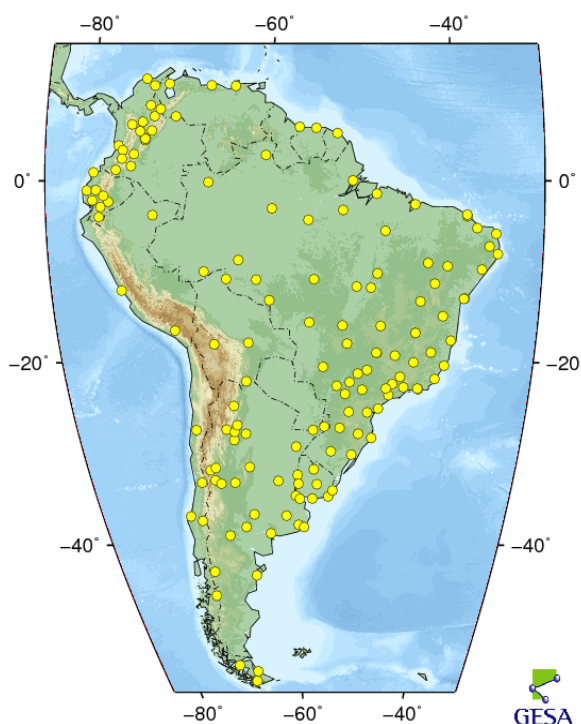
4.2.4 Mapa Regional da Ionosfera LPIM

Desde 2005, o centro de processamento de *La Plata* (CPLAT) utiliza o Modelo Ionosférico de *La Plata* (LPIM – *La Plata Ionospheric Model*) para gerar diariamente

mapas ionosféricos para a região de cobertura da rede SIRGAS. O VTEC é estimado considerando o sistema de referência solar-geomagnético com aplicação de harmônicos esféricos. O mapeamento do VTEC para a direção receptor satélite é realizado considerando o caso de uma camada infinitesimal da ionosfera (SIRGAS, 2014; CPLAT, 2014). Para o mapeamento do VTEC utiliza-se a hora local e latitude modificada, a qual permite suavizar a variabilidade espacial do VTEC, especialmente em regiões de baixa latitude como é o caso da região sul-americana.

Os mapas do LPIM são produzidos com resolução espacial de 1° em latitude e longitude e sua região de cobertura varia de -61° até 30° em latitude e de -110° a -20° em longitude com resolução temporal de 1 hora (BRUNINI et al, 2008). A Figura 3 apresenta a região geográfica de cobertura do LPIM.

Figura 3 – Região geográfica de cobertura do LPIM.



Fonte: <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar>. Acesso em Maio de 2015.

O STEC é estimado com base na combinação ionosférica denominado P4 e L4 que são, respectivamente, as combinações para a pseudodistância e fase nas portadoras L1 e L2. Esta combinação permite eliminar os erros envolvidos e também a geometria (distância geométrica) restando os valores de STEC, ambiguidades e atraso de *hardware* conforme pode ser visto na equação (4.9) (BRUNINI et al, 2008):

$$\begin{aligned} P_4 &= P_1 - P_2 = sTEC + b_r + b^s + v_p \\ L_4 &= L_1 - L_2 = sTEC + B_r + B^s + N_{arc} + v_L \end{aligned} \quad (4.9)$$

Onde, b_r e B_r são os atrasos de *hardware* nos receptores relacionados ao código e fase, respectivamente. b^s e B^s são os atrasos de *hardware* para os satélites no código e na fase, respectivamente. N_{arc} é ambiguidade que deve ser estimada para um arco contínuo de dados (intervalo para cada passagem do satélite sem interrupção do sinal). O cálculo da ambiguidade pode ser feito com base na combinação entre P4 e L4, onde se aplica a média para um arco de dados (com n épocas) como apresentado na equação 4.10 (BRUNINI, et al, 2008):

$$\begin{aligned} \langle L_4 - P_4 \rangle &= \frac{1}{n} \sum_1^n (L_4 - P_4) \\ \langle L_4 - P_4 \rangle_{arc} &= N_{arc} + B_r - b_r + B^s - b^s \end{aligned} \quad (4.10)$$

Onde, N_{arc} é a ambiguidade para a fase e o cálculo de $\langle L_4 - P_4 \rangle_{arc}$ requer o conhecimento dos atrasos de *hardware*. Uma vez obtida a ionosfera e obtido $\langle L_4 - P_4 \rangle_{arc}$ para o arco, calcula-se a o STEC com base na equação conhecida como fase nivelada pelo código conforme apresentada na equação (4.11) (BRUNINI, et al, 2008):

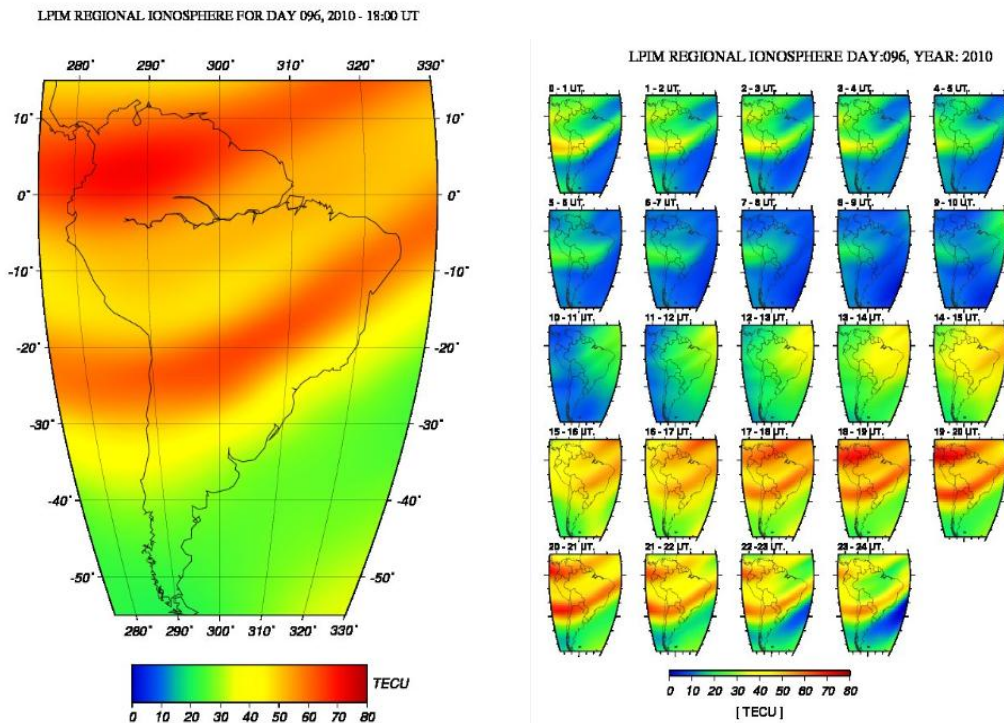
$$\tilde{L}_4 = L_4 - \langle L_4 - P_4 \rangle_{arc} = sTEC + b_r + b^s + v_\phi \quad (4.11)$$

Para converter o valor do STEC para a direção vertical (VTEC), é utilizado uma função de mapeamento (Equação 4.12), onde h é o ângulo horário do sistema solar fixo, ϕ é a latitude do ponto ionosférico (IP) (BRUNINI, et al, 2008):

$$\tilde{L}_{4r}^s = sf(z') * vTEC(h, \phi) + b_r + b^s + v_L \quad (4.12)$$

Enquanto o GIM é disponibilizado em formato IONEX, os valores de VTEC do LPIM são disponibilizados em grades numéricas organizadas em arquivos horários para cada dia do ano, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Mapas diários de VTEC para o dia 096 de 2010.



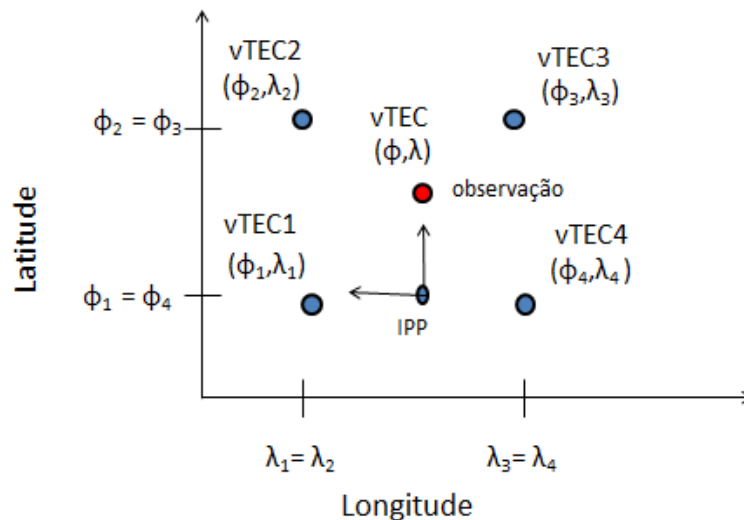
Fonte: <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar>. Acesso em Abr. 2015.

Para a utilização do VTEC do LPIM nos *softwares* de processamento de dados GNSS comumente utilizados, é necessária a conversão dos valores horários para o formato IONEX, visto que é o formato padrão utilizado. Os valores de VTEC são distribuídos em grades variando em função da latitude e da longitude e o usuário deve realizar um procedimento de interpolação considerando a variação temporal e espacial. A introdução ao processo de interpolação dos valores de VTEC dentro da grade é apresentada a seguir.

4.3 Interpolação do VTEC a partir dos mapas da ionosfera

Nos mapas da ionosfera tanto global quanto regional, os valores de VTEC são distribuídos em grades variando em função da latitude e da longitude, sendo necessário realizar um procedimento de interpolação para a posição do usuário considerando a variação temporal e espacial. No caso desse trabalho os valores de VTEC do GIM e LPIM foram interpolados utilizando interpolação bilinear no espaço e linear no tempo. Para cada grade com resolução espacial de $5^\circ \times 2,5^\circ$ no caso do GIM e $1^\circ \times 1^\circ$ no LPIM, são armazenados quatro valores de VTEC próximo à localização geográfica do usuário como exemplificado na Figura 5. A interpolação para cada mapa é realizada considerando a latitude e longitude do ponto ionosférico de cada satélite na altura da camada infinitesimal da ionosfera.

Figura 5 – Interpolação do VTEC para localização geográfica do usuário.



Para converter valores de VTEC medidos no ponto ionosférico em STEC (*slant* TEC - TEC inclinado) na direção entre o satélite e o receptor utiliza-se a seguinte função de mapeamento (CAMARGO, 1999; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001):

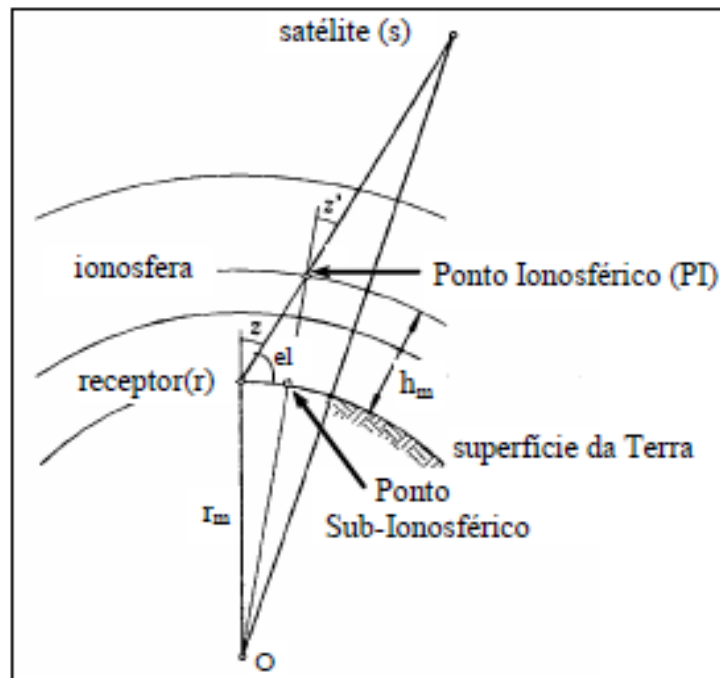
$$\text{STEC} = \text{VTEC} \cdot \text{IonoMF} \quad (4.13)$$

Nesta expressão, $\text{IonoMF} = 1 / \cos(z')$ é a função de mapeamento, onde z' é o ângulo zenital do caminho do sinal sobre o ponto ionosférico, o qual é calculado a partir de:

$$z' = \arcsen\left(\frac{r_m}{r_m + h_m} \sin(z)\right) \quad (4.14)$$

Na equação (4.14) tem-se que r_m é o raio médio da Terra, h_m representa a altura da camada da ionosfera, que geralmente varia entre 300 a 450 km e z é o ângulo zenital do satélite ($z = 90^\circ - el$, onde “ el ” é o ângulo de elevação do satélite). A Figura 6 ilustra as quantidades envolvidas na equação (4.14).

Figura 6 – Geometria da trajetória do sinal GPS na ionosfera.



Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof *et al.* (2001).

O cálculo do efeito ionosférico na portadora L1 é realizado a partir das equações 4.1 e 4.2. Outra estratégia que pode ser utilizada para correção da ionosfera no posicionamento é aplicar a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera no ajustamento dos dados GPS, como é apresentada a seguir.

4.4 Estimativa dos efeitos residuais da ionosfera

No caso da estimativa estocástica dos efeitos residuais da ionosfera no PPP, aplica-se um modelo matemático onde os efeitos residuais são estimados no ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (M.M.Q.) juntamente com outros parâmetros, tais como: coordenadas do receptor, erro do relógio do receptor, atraso troposférico (componente úmida) e ambiguidades. Neste caso, os parâmetros da ionosfera tratados como processo estocástico no ajustamento recursivo dos dados GNSS, fazendo uso de modelos de correlação, tais como: o *random walk* e *White noise* definidos na seção 2.2 (MARQUES, 2012; MONICO, 2008; GEMAEL, 1994).

4.4.1 Modelo Matemático do PPP com estimativa da ionosfera

Considerando a equação de pseudodistância e de fase (Equação 3.1 e 3.2), o modelo matemático linearizado do PPP para dados de simples frequência (C/A e L1), considerando a estimativa da ionosfera no ajustamento pelo M.M.Q., é representado a seguir na forma matricial $E\{L\} = AX$ pode ser escrita como (4.15):

$$E\left\{\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta PD_{L1r}^{s_i} \\ \Delta \phi_{L1r}^{s_i} \\ \Delta Iono_{L1}^{p_{obs}, s_i} \end{bmatrix}}_{E\{L\}}\right\} = AX = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & 0 & 1 \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & \lambda_{L1} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_A * \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ Zwd \\ N_{rLi}^{s_i} \\ Iono_{L1}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Onde:

i – é o índice que representa o número de satélites.

$\Delta Iono_{L1}^{p_{obs}, s_i}$ - pseudo-observação da ionosfera na L1;

$Iono_{L1}^{s_i}$ - parâmetro do atraso ionosférico na frequência L1 para cada satélite.

Os demais termos foram definidos na seção 3.2 no modelo matemático para do PPP. Observa-se no modelo matemático linearizado (5.1) além de estimar o valor da ionosfera ($\text{Iono}_{L1}^{s_i}$), a componente úmida da troposfera (Z_{wd}) também é estimada juntamente com o erro do relógio do receptor, ambiguidades e coordenadas do receptor.

No posicionamento com dupla frequência, o modelo funcional para a estimativa dos efeitos ionosféricos é dado por:

$$E \left\{ \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta PD_{L1r}^{s_i} \\ \Delta \phi_{L1r}^{s_i} \\ \Delta PD_{L2r}^{s_i} \\ \Delta \phi_{L2r}^{s_i} \\ \Delta \text{Iono}_{L1}^{P_{obs}, s_i} \end{bmatrix}}_{E\{L\}} \right\} = AX = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & \lambda_{L1} & 0 & -1 \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & 0 & 0 & \beta \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & Mf & 0 & \lambda_{L2} & -\beta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_A * \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ Z_{wd} \\ \Delta N_{L1r}^{s_i} \\ \Delta N_{L2r}^s \\ \text{Iono}_{L1}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

onde:

$$\beta = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 - \text{coeficiente que relaciona a ionosfera na frequência L1 com a L2.}$$

Para o caso do PPP, aplicam-se órbitas e correções precisas dos relógios dos satélites. Os atrasos de *hardware*, geralmente são encontrados e acessados no modo relativo, ou seja, quando se faz combinações entre medidas de diferentes frequências e, para o caso de medidas derivadas do código é conhecido como DCB (*Differential Code Bias*). Valores mensais de DCBs podem ser obtidos através da agência CODE. Caso estes efeitos não sejam modelados, geralmente são estimados juntamente com o erro do relógio do receptor ou com a ionosfera e ambiguidades no caso da utilização da fase.

Na modelagem estocástica para o caso de estimativa da ionosfera é introduzida uma pseudo-observação ($\text{Iono}^{P_{obs}}$) para cada resíduo ionosférico

(direção receptor-satélite) com um determinado desvio-padrão ($\sigma_{\text{Iono}^{\text{Pobs}}}$) associado para cada pseudo-observação.

O desvio-padrão para a pseudo-observação da ionosfera deve ser adotado pelo usuário, de forma que requer conhecimento sobre as condições da ionosfera para o período de coleta dos dados. O valor inicial da pseudo-observação deve ser um valor próximo da realidade e, sendo assim, pode-se adotar o valor calculado pelo modelo de Klobuchar ou advindo de mapas globais ou regionais da ionosfera (SCHAER e GURTNER, 1998; CAMARGO, 1999). O valor do desvio-padrão da pseudo-observação pode variar de valores muito próximos de zero a valores teoricamente infinitos, dependendo da atividade ionosférica no momento do posicionamento GNSS. Ao adotar um valor de desvio padrão próximo de zero para a pseudo-observação assume-se que as propriedades estatísticas desta variável são bem conhecidas e ela é praticamente tratada como uma injunção absoluta. Ao contrário, ao adotar um valor alto de desvio padrão para a pseudo-observação, assume-se que poucas informações estocásticas do parâmetro são conhecidas e este parâmetro certamente absorverá outros efeitos no ajustamento dos dados, como por exemplo, os atrasos de *hardware* e outros. (ODIJK, 2002; MARQUES, 2012).

A matriz peso do ajustamento é acrescida dos pesos relacionados com os parâmetros da ionosfera e o vetor das observações L_b é acrescentado com as pseudo-observações para cada satélite em cada época. A grande vantagem desse método é o fato de preservar a característica de número inteiro da ambiguidade do sinal, facilitando a aplicação de algoritmos de solução de ambiguidade. Neste caso, os valores de atraso de *hardware* devem ser conhecidos.

Para o caso do PPP, a MVC das observações é uma matriz na forma diagonal, visto que, geralmente, não se considera as correlações entre as observações (MARQUES, 2012). Considerando a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera para o código e fase da portadora, a MVC das observações coletadas para o caso de simples frequência (C/A + L1), será dada por (4.17):

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{PD_{L1}^{si}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2_{\phi_{L1}^{si}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2_{Iono_{L1}^{Pobs,s1}} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

onde, $\sigma^2_{PD_{L1}^{si}}$ e $\sigma^2_{\phi_{L1}^{si}}$ ($i=1,2,...,n$) representam, respectivamente, as variâncias do código e da fase e $\sigma^2_{Iono_{L1}^{Pobs,s1}}$ representa a variância para a pseudo-observação da ionosfera.

5. METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada na pesquisa, desde as estações utilizadas nos experimentos, às adaptações realizadas no *software* e as estratégias adotadas para o processamento e análise dos resultados.

Os experimentos envolvidos na avaliação da correção do efeito da ionosfera no processamento de dados GPS no método PPP foram realizados a partir de dados obtidos de receptores GNSS pertencentes à RBMC coletados em períodos de alta e baixa atividade ionosférica para um dia em 2010, dois dias em 2011 e 2012 e para todos os dias do ano de 2013. Para o processamento dos dados GPS foi utilizado o *software* RT_PPP (*Real Time PPP*), o qual permite realizar processamento dos dados no modo PPP, seja em tempo real ou pós-processado (MARQUES, 2012). O RT_PPP permite a leitura dos valores de TEC a partir do GIM, a aplicação dos modelos de Klobuchar e estimativa da ionosfera para dados de simples frequência. Adaptações no código fonte foram realizadas para a leitura e interpolação de dados do mapa regional LPIM. Os dados GPS foram processados considerando solução estática, cinemática e época por época. Apesar das estações da RBMC serem estáticas, o PPP no modo cinemático permite estimar as coordenadas em cada época e ambiguidades de forma recursiva sendo possível comparar as coordenadas estimadas com as coordenadas disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON (SIRGAS-CONTÍNUO).

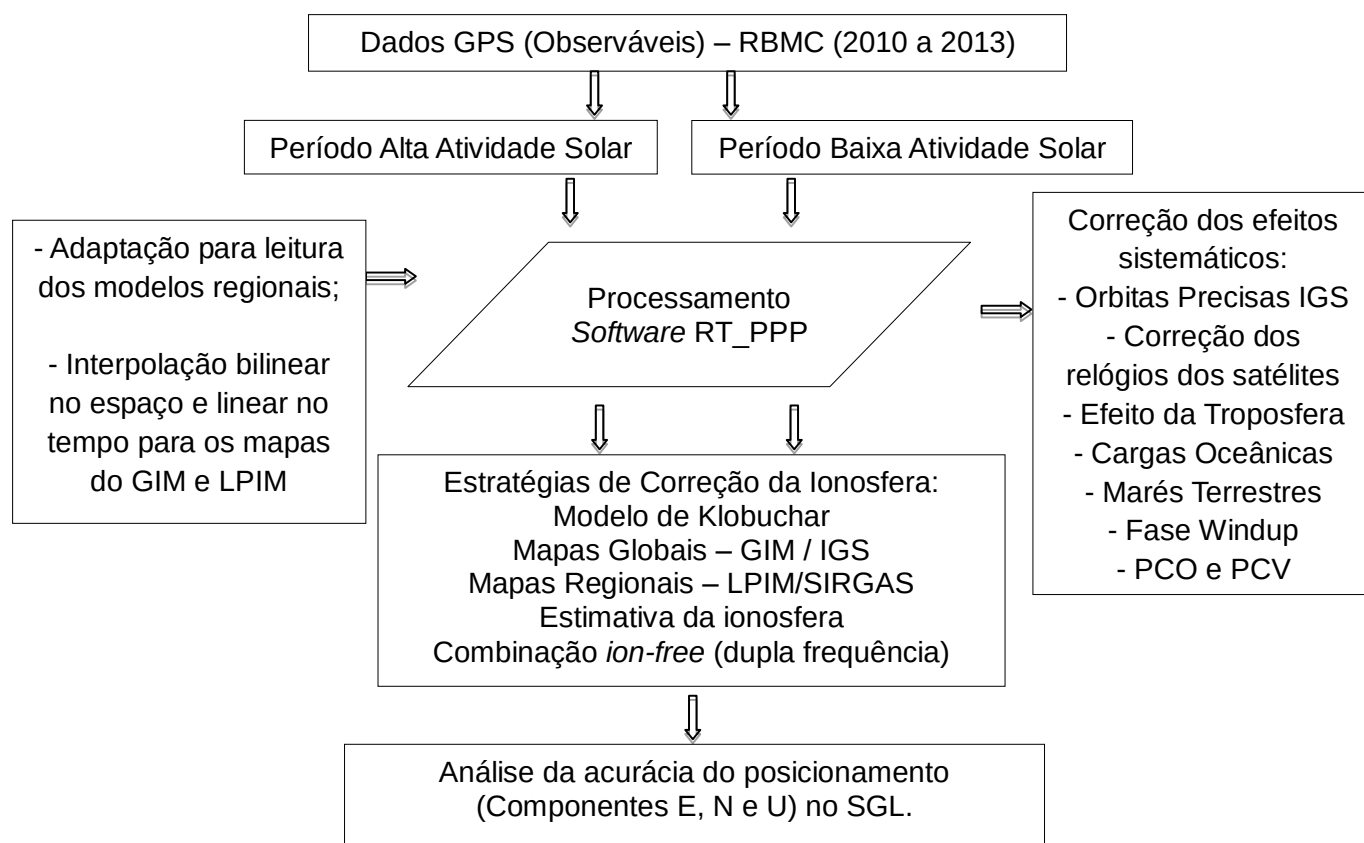
Para correção dos efeitos sistemáticos envolvidos no PPP, foram aplicadas correções dos efeitos da troposfera, pelo modelo de Hopfield quando aplicado os modelos globais e regionais da ionosfera. No caso da utilização da combinação *ion-free* da estimativa da ionosfera, a componente úmida da foi estimada. Em todos os processamentos, aplicaram-se correções de Marés Oceânicas e Terrestres, PCV (Variação do Centro de Fase das Antenas) e o PCO (Centro de Fase *Offset* das Antenas), correções relativistas, além de utilizar as efemérides precisas produzidas pelo IGS e correções precisas do erro dos relógios dos satélites.

Os processamentos no PPP foram realizados considerando medidas de pseudodistâncias (Código C/A) e/ou de fase da portadora (L1). Desta forma, as estratégias de correção da ionosfera envolveram: correção a partir do modelo de Klobuchar, dos Mapas Ionosféricos de La Plata (LPIM) e dos Mapas Globais da

Ionosfera (GIM), além da estimativa da ionosfera. Os valores de VTEC do GIM e LPIM são interpolados usando interpolação bilinear no espaço e linear para o tempo. Para o caso de dupla frequência processamentos foram realizados aplicando a combinação *ion-free* cujo objetivo foi comparar com a solução advinda da estratégia de estimativa da ionosfera para PPP com dados de simples frequência.

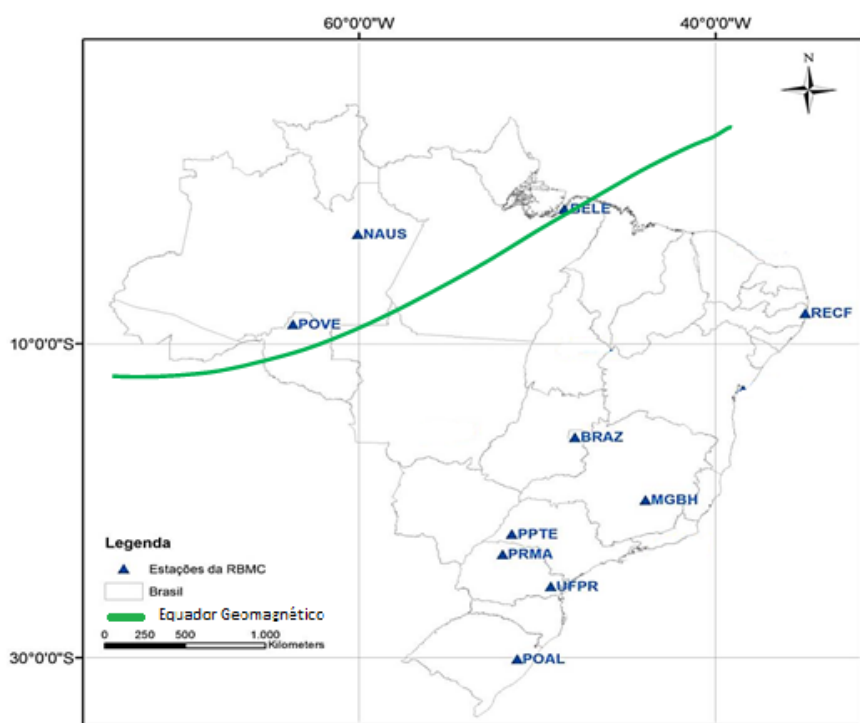
As coordenadas estimadas no PPP em cada solução foram comparadas com as coordenadas estimadas na solução semanal SIRGAS-CON, o que se denominou de “erro”. Neste caso, as análises foram realizadas em termos de acurácia, utilizando o EMQ para as componentes Este (E), Norte (N) e Altura (U) relacionada ao plano do Sistema Geodésico Local (SGL). O EMQ leva em consideração medidas de tendência e precisão e pode ser tomado com um medidor de acurácia (MONICO et al., 2009). A seguir será apresentada a metodologia detalhada. A Figura 7 mostra o fluxograma representando resumidamente as etapas envolvidas no processamento de dados GPS no software RT_PPP:

Figura 7 – Fluxograma da metodologia envolvida no processamento dos dados.



Nos experimentos foram utilizados dados de dez estações ativas pertencentes à RBMC (Figura 8), as quais estão distribuídas em diferentes latitudes ao longo do território brasileiro (regiões Norte, Sul, Nordeste, Sudeste e Centro-oeste), considerando que cada região possui características diferentes que podem influenciar de forma diferente no posicionamento GPS.

Figura 8 – Localização das estações da RBMC utilizadas nos processamentos de dados GPS.



5.1 Estratégias de processamento no *software* RT_PPP

Para realização dos experimentos nesta pesquisa foi utilizado o *software* RT_PPP, o qual foi desenvolvido por (MARQUES, 2012). O RT_PPP permite processar dados GPS com medidas de código e fase, de simples ou dupla frequência no modo PPP estático, cinemático e época por época, seja pós-processado ou em tempo real.

Segundo MARQUES (2012), no RT_PPP foi implementada a estimativa dos parâmetros com base no Filtro de Kalman e aplicação do controle de qualidade DIA (Detecção, Identificação e Adaptação), bem como diversos modelos matemáticos para a correção dos efeitos sistemáticos envolvidos no posicionamento GPS.

No processamento PPP se faz necessário à modelagem de praticamente todos os efeitos envolvidos nas medidas GPS, esses efeitos podem ser tratados a partir de modelos matemáticos ou estimados junto com os outros parâmetros, tais como as coordenadas do usuário e o erro do relógio do receptor. No RT_PPP modelos matemáticos foram implementados para modelagem desses efeitos, divididos em efeitos relacionados à estação, satélite e a propagação dos sinais. A Tabela 4 mostra a estratégia de processamento adotado no RT_PPP para o processamento dos dados pelo método PPP nesta pesquisa.

Tabela 4 – Estratégias adotadas nos processamentos.

Estratégia de Processamento	
Órbitas dos satélites	Efemérides Precisas Finais do IGS
Relógios dos satélites	Correções geradas pelo IGS com latência de 30s
Máscara de elevação	10 graus
Atraso Troposférico	- Modelo de Hopfield (nos experimentos com os mapas ionosféricos) - Estimativa aplicando <i>random walk</i> (0,005 m/h) (na estimativa da ionosfera e na combinação <i>ion free</i>)
Atraso Ionosférico	- Modelo de Klobuchar - Mapas Globais da Ionosfera (GIM) - Modelo de La Plata (LPIM) - Combinação <i>ion-free</i> (dupla frequência) - Estimativa a partir de processos estocásticos
Carga de marés oceânicas	Coeficientes no formato HARPOS
Marés terrestres	Modelo proposto pelo IERS 2003
Centro de fase da antena do satélite e do receptor	Correção do centro de fase das antenas com base nos dados de calibração absoluta de antenas (PCV e PCO)
DCBs	Valores estimados pela Agência CODE
Ambiguidades	Solução <i>float</i>
Fase <i>windup</i>	Aplicado para a fase da onda portadora

Fonte: Marques (2012).

Diversos modelos matemáticos são implementados no *software* RT_PPP, como pode ser visto na Tabela 4, podendo-se citar: carga de marés oceânicas e

marés terrestres, PCV e PCO da antena do receptor e do satélite, o atraso de *hardware* (DCB – *Delay Code Bias*), fase *windup*, entre outros (MARQUES, 2012). Com relação às ambiguidades da fase da onda portadora, o RT_PPP as estima como solução *float* (MONICO, 2008).

Os mapas globais e os valores dos DCBs para os satélites GPS, bem como para os receptores que fazem parte da rede de estações ativas do IGS, são estimados diariamente e mensalmente pelo CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*) e podem ser encontrados em <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/> ou em <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE> (Acesso em mar. de 2015).

A leitura e interpolação dos valores de VTEC advindos dos mapas regionais foram adaptadas no software RT_PPP, cuja breve descrição é dada na próxima seção.

5.2 Adaptação do RT_PPP para interpolação do VTEC advindo dos mapas ionosféricos regionais

Com o objetivo de avaliar a acurácia do PPP quando aplicada as estratégias de correção mencionadas anteriormente e com a disponibilidade de uso dos mapas regionais em especial o LPIM, o qual utiliza estações da rede SIRGAS, foram implementadas adaptações na leitura dos mapas LPIM e na interpolação dos valores de VTEC.

Os mapas LPIM estão disponíveis em arquivos horários no total de 24 mapas da ionosfera por dia, contendo latitude, longitude e valor de VTEC. Para utilizar esses mapas foi realizada uma conversão de formato para IONEX. Dentre as adaptações realizadas, estão: a inversão da sequência das coordenadas no arquivo do LPIM, a inversão do processo de leitura e a mudança na leitura do cabeçalho do arquivo IONEX.

Na primeira adaptação foi desenvolvido um executável em C para inverter a orientação das latitudes de sul a norte (-60° a 30°) para norte a sul (30° a -60°), no intuito das diferenças entre as coordenadas nas grades do mapa do LPIM não ficassem negativas durante a conversão para IONEX. Na segunda adaptação foi utilizado um executável em Fortran para unificar os mapas diários no total de 25

mapas em apenas um mapa diário e posteriormente converter este mapa para o formato IONEX. O executável utilizado nessa conversão foi denominado Ipim2ionex, desenvolvido em cooperação entre o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e o Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE.

Nos mapas da ionosfera tanto global quanto regional, os valores de VTEC são distribuídos em grade variando em função da latitude e da longitude, sendo necessário realizar um procedimento de interpolação considerando a variação temporal e espacial com o objetivo de obter o valor de VTEC mais próximo do usuário. Os valores de VTEC são interpolados considerando a latitude e longitude do ponto ionosférico de cada satélite.

Após a etapa de leitura dos mapas da ionosfera e armazenadas as grades com os valores de VTEC próximo à localização do usuário, a interpolação (Seção 4.3) é realizada utilizando os valores de VTEC das quatro coordenadas da grade mais próximas da coordenada do receptor do usuário.

5.3 Análise dos resultados

As análises dos resultados dos processamentos foram realizadas através da comparação das soluções obtidas para cada experimento (coordenadas estimadas) com as soluções adotadas como referência, ITRF2008, fornecidas pela rede SIRGAS-CON. As discrepâncias de cada experimento foram calculadas a partir das coordenadas de referência e transformadas para o Sistema Geodésico Local juntamente com suas respectivas precisões, as análises foram realizadas de acordo com as componentes (Este, Norte e Altura – E, N e U) obtidas. Para analisar a acurácia do posicionamento, foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ) (em unidades de metros), onde a acurácia envolve medida de tendência e precisão e o EMQ pode ser tomado como um medidor de acurácia.

Em seguida, algumas considerações necessárias com relação os cálculos estatísticos adotados nas análises são apresentadas:

A diferença entre a coordenada estimada com a coordenada adotada como referência para cada experimento foi denominada de erro conforme apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} DE &= E_{\text{ESTIMATIVA}} - E_{\text{REFERÊNCIA}} \\ DN &= N_{\text{ESTIMATIVA}} - N_{\text{REFERÊNCIA}} \\ DU &= U_{\text{ESTIMATIVA}} - U_{\text{REFERÊNCIA}} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Para cada erro nas componentes planimétrica e altimétrica são geradas as componentes no SGL DE, DN e DU, correspondendo às coordenadas em Este, Norte e Altitude.

- O Erro Médio Quadrático, que é assumido como medidor de acurácia nas análises, foi obtido para cada componente por:

$$\begin{aligned} EMQ_{DE} &= \sqrt{DE^2 + \sigma_{DE}^2} \\ EMQ_{DN} &= \sqrt{DN^2 + \sigma_{DN}^2} \\ EMQ_{DU} &= \sqrt{DU^2 + \sigma_{DU}^2} \end{aligned} \quad (6.2)$$

onde, DE, DN e DU representam a tendência entre as coordenadas conhecidas e as advindas do processamento GPS, na época de observação, calculado a partir da média do erro médio diária ou anual; e σ_{DE} σ_{DN} σ_{DU} representam a precisão das componentes DE, DN e DU.

6. EXPERIMENTOS REALIZADOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os experimentos realizados visando avaliar a acurácia posicional do PPP quando aplicadas as estratégias de correção da ionosfera. Os resultados foram divididos em três seções 6.1, 6.2 e 6.3. A seção 6.1 contém os experimentos relacionados com a avaliação dos modelos de correção da ionosfera advinda dos mapas no posicionamento com solução diária para dados de simples frequência, considerando três modos de processamento (estático, cinemático e época por época); a seção 6.2 contém os experimentos relacionados com a avaliação da acurácia posicional ao aplicar os mapas globais e regionais da ionosfera, onde foram adotados pesos (ver seção 3.1) para a ionosfera em função dos mapas utilizados e a seção 6.3 contém os experimentos relacionados com a avaliação da estimativa dos efeitos residuais da ionosfera utilizando código e fase na L1 e aplicação da combinação *ion-free*. Cada seção contém as descrições dos processamentos, tais como: o modo de processamento, as observáveis GPS utilizada, dias e estações GPS utilizadas, as séries temporais diárias e anuais das coordenadas estimadas com suas respectivas análises de acurácia.

6.1 Avaliação dos modelos de correção da ionosfera no posicionamento com solução diária

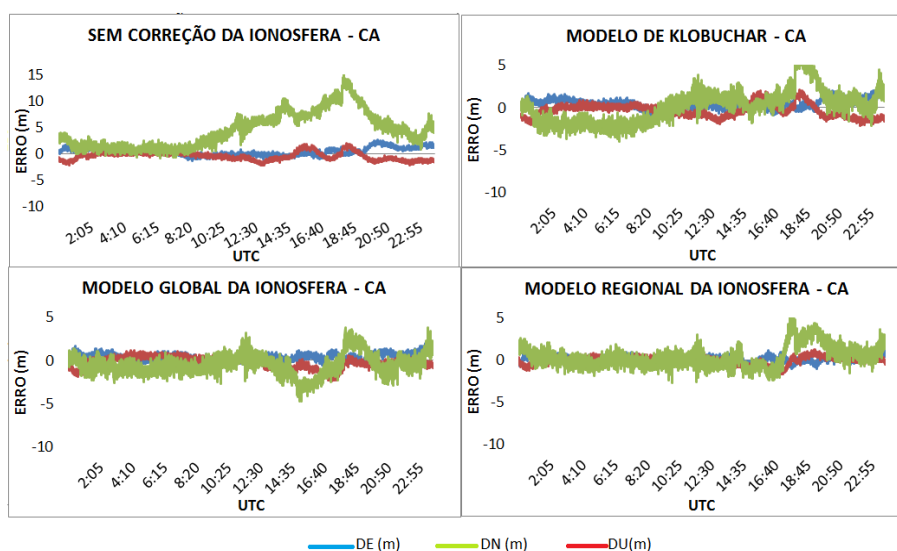
6.1.1 Avaliação do PPP (código e fase) com diferentes estratégias de correção da ionosfera

Nesta seção são apresentados os resultados do PPP para dados de código e fase na portadora L1 aplicando os diferentes modelos de correção da ionosfera. O objetivo destes experimentos é avaliar a acurácia posicional do PPP com a modelagem da ionosfera quando utilizadas observáveis de código no modo época por época e no modo cinemático e estático ao realizar PPP. .

Foram realizados experimentos com dados da estação RECF (Lat: -8°; Lon: -34°), localizada na cidade de Recife/PE, no dia 12/09/2010 (dia 255). O dia foi considerado com ionosfera calma segundo o índice geomagnético Kp.

Em todos os processamentos, seja aplicando somente código ou código e fase, foram considerados quatro estratégias de correção da ionosfera, sendo elas: sem correção da ionosfera, correção pelo modelo de Klobuchar e a partir dos mapas globais e regionais da ionosfera. Os efeitos da troposfera foram corrigidos a partir do modelo de Hopfield e todas as correções do PPP foram aplicadas (ver Tabela 4). As precisões das medidas GPS foram adotadas com valores de 0,80 m para código C/A e 0,008 m para fase L1 e aplicadas as estratégias de ponderação apresentadas na seção 3.2. A Figura 9 mostra a série temporal diária dos “erros” nas componentes E, N e U do SGL para cada um dos processamentos realizados utilizando apenas as medidas de código C/A.

Figura 9 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétrica e altimétrica nos processamentos com código C/A no modo época por época.



Observa-se na Figura 9 que até às 12:00 h os erros foram menores que 5 metros, após às 12:30 é apresentado o primeiro pico e as 18:45 h o segundo pico, com valores ultrapassando 10 metros no posicionamento sem correção da ionosfera e quando aplicado as correções da ionosfera o erro foi inferior a 5 metros próximo das 20:50 h.

As Figuras 10 e 11 mostram a série temporal diária dos “erros” nas componentes E, N e U no SGL ao aplicar as diferentes estratégias de correção da ionosfera no processamento PPP no modo cinemático e estático, respectivamente, com uso do código C/A e fase L1.

Figura 10 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código e fase C/A+L1 no modo cinemático.

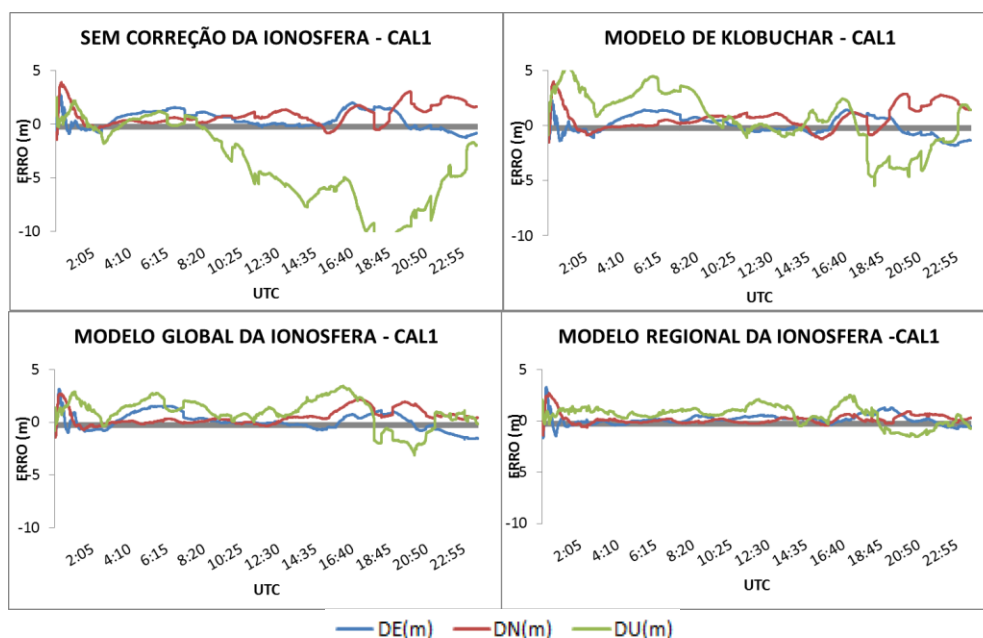
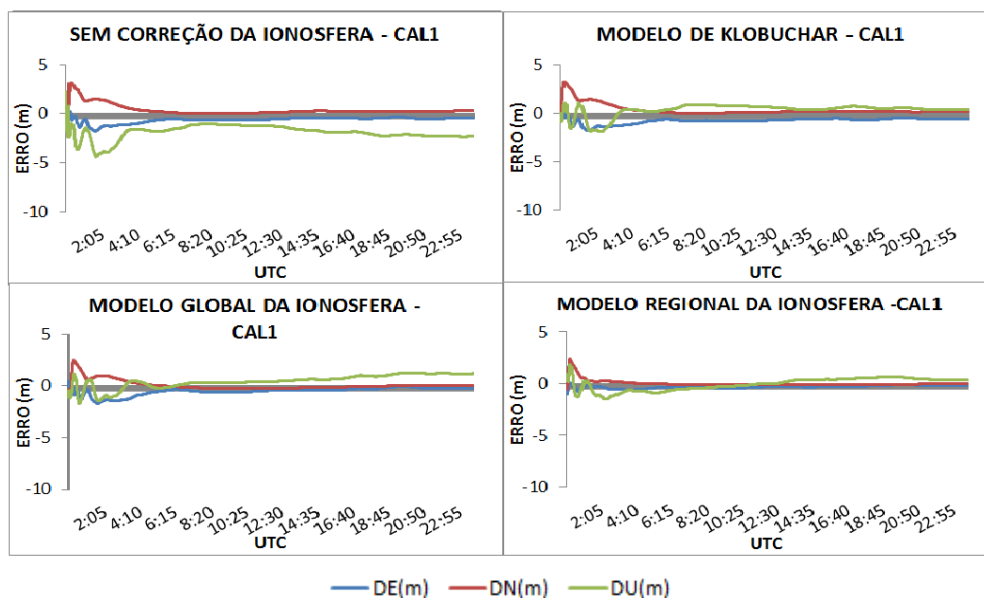


Figura 11 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código e fase C/A+L1 no modo estático.



Na Figura 10, o posicionamento apresentou uma degradação no erro posicional no início do processamento e após a convergência posicional as 14:35 o erro nas três componentes apresentou valores inferiores a 1 metro, quando aplicado as correções da ionosfera.

O erro médio, o desvio-padrão e o EMQ da solução diária dos “erros” nas componentes E, N e U em metros para cada processamento são mostrados na Tabela 5. O valor de EMQ foi obtido através da resultante do erro médio (tendência) e do desvio-padrão (incerteza), o que representa uma medida de acurácia.

Tabela 5 – Análises estatísticas aplicando as correções da ionosfera com código e fase.

Estratégia de correção da ionosfera	Dia 255 2010	C/A (época por época)			C/A+L1 (cinemático)			C/A+L1 (estático)		
		DE (m)	DN (m)	DU (m)	DE (m)	DN (m)	DU (m)	DE (m)	DN (m)	DU (m)
SEM CORREÇÃO	Erro Médio	0,387	-0,414	4,395	0,410	0,863	-3,784	-0,644	0,377	-1,902
	Desvio Padrão	0,732	0,767	3,364	0,808	0,923	3,817	0,289	0,523	0,696
	EMQ	0,828	0,872	5,535	0,906	1,264	5,375	0,706	0,644	2,026
MODELO DE KLOBUCHAR	Erro Médio	0,397	-0,293	-0,001	0,045	0,698	0,664	0,003	0,001	0,006
	Desvio Padrão	0,609	0,769	1,901	0,852	1,047	2,464	0,023	0,018	0,055
	EMQ	0,727	0,823	1,901	0,853	1,258	2,552	0,023	0,019	0,056
MAPA GLOBAL DA IONOSFERA	Erro Médio	0,318	-0,178	-0,560	0,089	0,497	0,969	0,004	0,001	0,006
	Desvio Padrão	0,537	0,578	1,336	0,802	0,722	1,340	0,023	0,018	0,053
	EMQ	0,624	0,605	1,449	0,807	0,876	1,654	0,023	0,018	0,053
MAPA REGIONAL DA IONOSFERA	Erro Médio	0,064	0,050	0,323	0,129	0,159	0,572	0,003	0,001	0,006
	Desvio Padrão	0,409	0,411	1,253	0,486	0,473	0,897	0,023	0,018	0,053
	EMQ	0,414	0,414	1,294	0,503	0,499	1,064	0,023	0,018	0,053

Nota-se que os valores EMQ para componente altimétrica DU como mostrado na Tabela 5 são da ordem de metros, provando que a componente altimétrica é mais afetada pelo efeito ionosférico. Observa-se que os resultados ao aplicar os mapas regionais da ionosfera apresentaram valores melhores em relação às demais estratégias. Comparando o EMQ do PPP época por época utilizando apenas as observáveis de código, ao aplicar os mapas regionais com o posicionamento sem correção da ionosfera nas componentes planimétricas e altimétrica a melhoria foi de

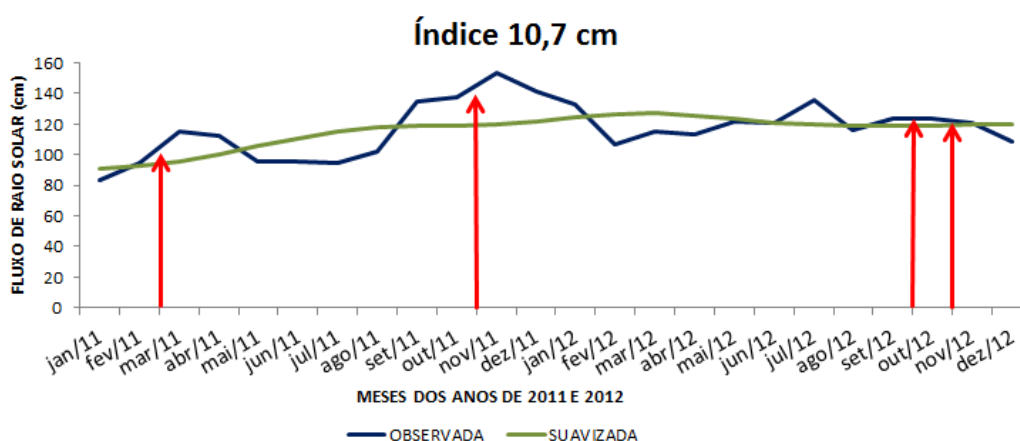
50% para DE, 52% para DN e 76% para DU. Quando comparado o posicionamento aplicando os mapas regionais em relação o modelo de Klobuchar a melhoria foi de 43% DE, 49% para DN e 32% para DU; e quando comparado os mapas regionais com os mapas globais a foi de 33% para DE, 31% para DN e 10% para DU. A diferença apresentada quando se adiciona a fase está relacionada com a estimativa da ambiguidade, pois no posicionamento estes parâmetros (ambiguidades) absorvem os efeitos da ionosfera, principalmente no caso cinemático, afetando a estimativa das coordenadas e degradando a acurácia posicional.

6.1.2 Avaliação do PPP com código para dias com alta e baixa atividade solar

Neste experimento, foram utilizados dados GPS da estação RECF e as mesmas configurações apresentadas na Tabela 4 da seção 6.1. Os dados utilizados nos experimentos foram para os dias 71 e 327 de 2011 e 283 e 315 de 2012, sendo a escolha destes dias baseada no fluxo de raio solar segundo o índice 10,7 cm (Figuras 12), que é um excelente indicador da atividade solar, onde índice 10,7 cm está relacionado com o número manchas solares, os valores podem ser acessados em <http://www.swpc.noaa.gov/> (Acesso: 13 de julho de 2015).

O processamento PPP foi realizado utilizando observáveis de código C/A, no modo época por época, onde foram considerados quatro estratégias de correção da ionosfera: sem correção da ionosfera, correção pelo modelo de Klobuchar e a partir dos mapas globais e regionais da ionosfera.

Figura 12 – Índice 10,7 para os anos de 2011 e 2012.



As Figuras 13 e 14 mostram as séries temporais diárias dos “erros” nas componentes E, N e U no SGL para as diferentes estratégias de processamentos PPP no modo época por época, para o dia 71 e 327 do ano de 2011, utilizando somente o código (C/A).

Figura 13 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de alta atividade solar.

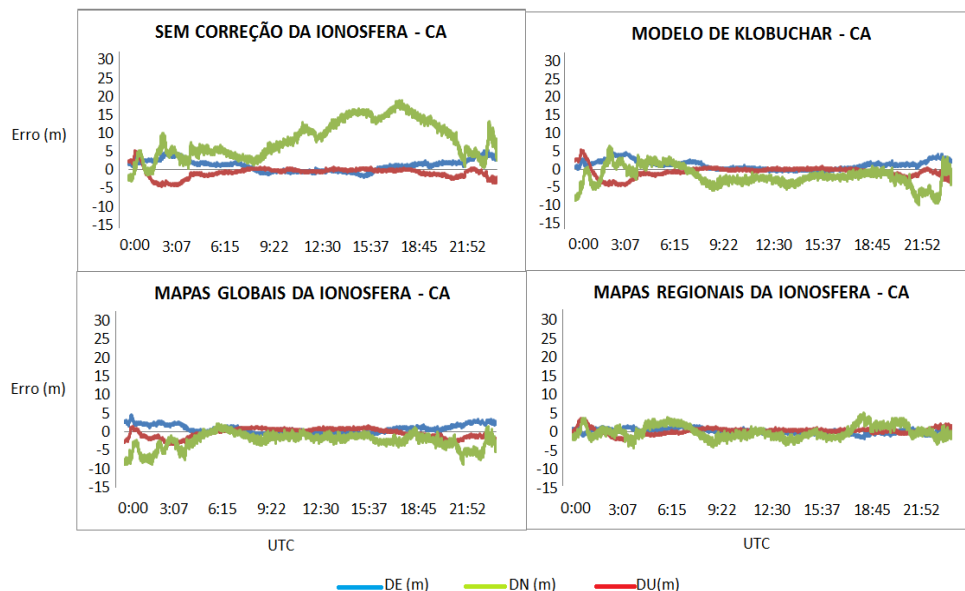
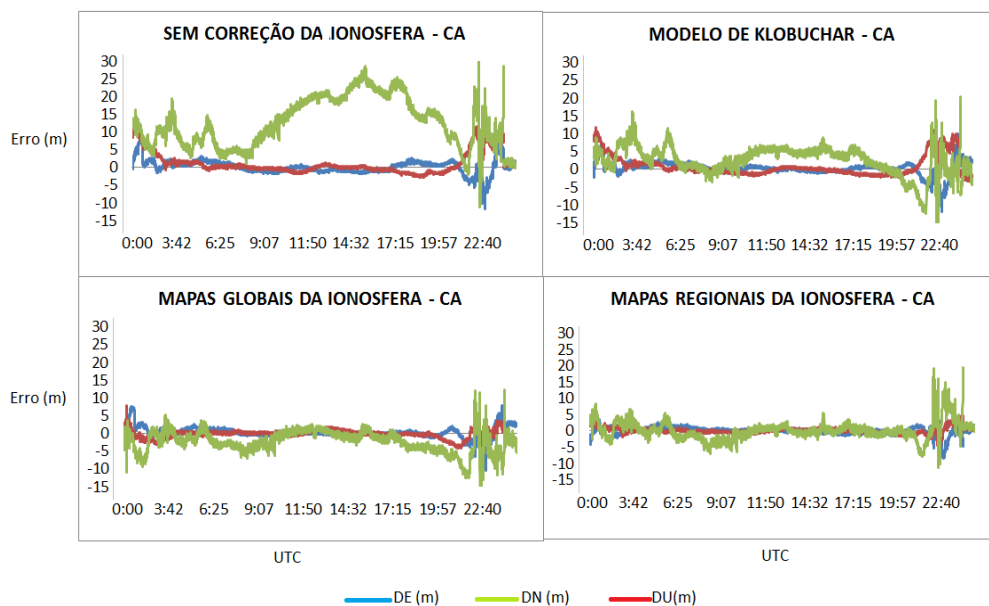


Figura 14 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de baixa atividade solar.



Apresentadas nas Figuras 13 e 14 as séries temporais diárias com a correção da ionosfera, dois picos com valores superiores a 1 metro são observados nas primeiras horas e no final do dia. Esses picos podem estar relacionados com efeitos de cintilação ionosférica que ocorrem nos períodos noturnos ou outros efeitos que as coordenadas estimadas absorvem e não foram modelados.

As Tabelas 6 e 7 apresentam o EMQ diário para cada componente e em 2D e 3D do SGL (em metros).

Tabela 6 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de alta atividade solar.

2011_071	EMQ (m)				
Estratégias	DE	DN	DU	2D	3D
Sem Correção	1,915	1,658	9,599	2,532	9,926
Klobuchar	1,685	1,632	3,323	2,345	4,067
GIM	1,351	1,304	3,229	1,877	3,735
LPIM	0,638	0,862	1,676	1,071	1,989

Tabela 7 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de baixa atividade solar.

2011_327	EMQ Diário (m)				
Estratégias	DE	DN	DU	2D	3D
Sem Correção	2,017	3,154	14,474	3,743	14,950
Klobuchar	1,911	2,982	4,704	3,541	5,888
GIM	1,672	1,336	3,843	2,140	4,398
LPIM	1,203	1,082	2,936	1,617	3,351

Na Tabela 6 verifica-se que o EMQ em 2D e 3D foi de 1,877 m e 3,735 m, respectivamente, para o caso da utilização do GIM e no caso da aplicação do LPIM, o EMQ 2D e 3D foi, respectivamente de 1,071 m e 1,989 m, o que representa uma melhoria de aproximadamente 43% e 47%, respectivamente ao aplicar o LPIM em relação ao GIM.

Na Tabela 7, verifica-se que o EMQ em 2D e 3D foi, respectivamente 2,140 m e 4,398 m para o caso da utilização do GIM e no caso da aplicação do LPIM, o EMQ

2D e 3D foi de 1,617 m e 3,351 m, respectivamente, o que representa uma melhoria de aproximadamente 24% no erro 2D e 3D ao aplicar o LPIM em relação ao GIM.

Para confirmar o melhoramento das coordenadas estimadas quando aplicado os modelos globais e regionais de correção da ionosfera, foram realizados processamentos PPP para os dias 283 e 315 de 2012, cuja atividade ionosférica é apresentada na Figura 12.

As Figuras 15 e 16 mostram a série temporal diária dos “erros” em planimetria e altimetria para os processamentos realizados aplicando as mesmas estratégias dos experimentos anteriores, para o dia 283 e 315 do ano de 2012, utilizando somente as pseudodistâncias (C/A).

Figura 15 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de alta atividade solar.

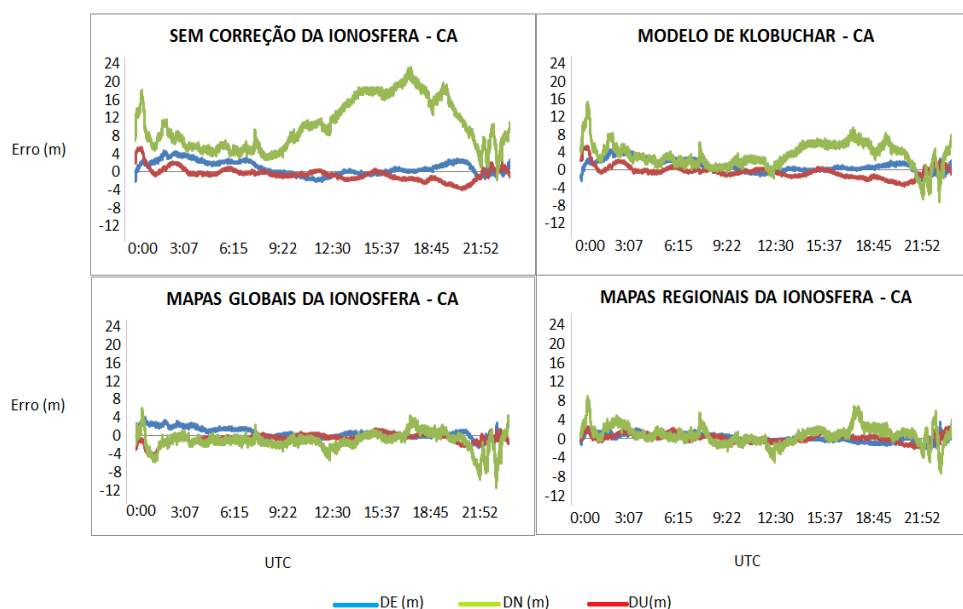
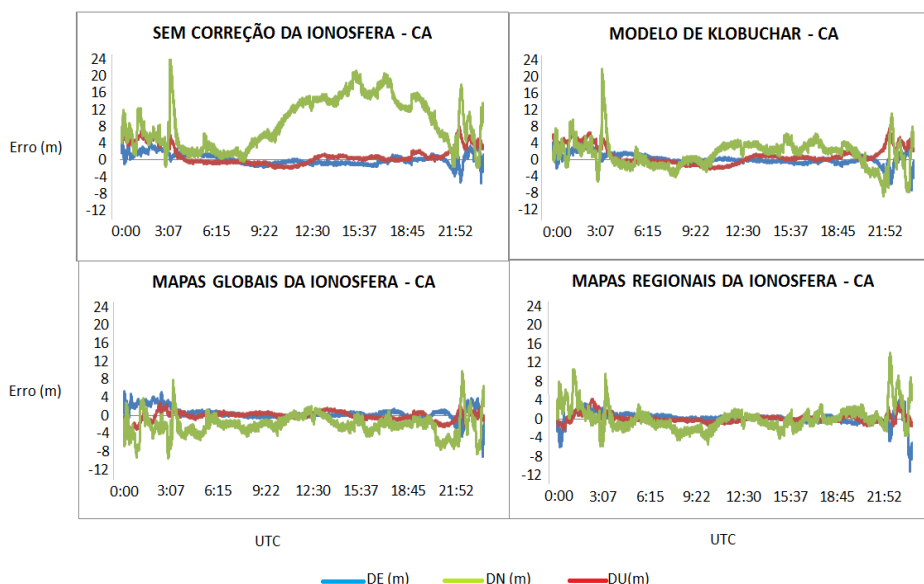


Figura 16 – Série temporal dos “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica nos processamentos com código C/A para o dia de baixa atividade solar.



Analisando as Figuras 15 e 16, verifica-se a melhoria no posicionamento, especialmente para a componente altimétrica, ao aplicar a correção da ionosfera a partir dos modelos em relação a não correção deste efeito (Sem Correção).

As Tabelas 8 e 9 apresentam o EMQ diário para cada componente e em 2D e 3D do SGL (em metros).

Tabela 8 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de alta atividade solar.

2012_283	EMQ (m)				
Estratégias	DE	DN	DU	2D	3D
Sem Correção	1,715	1,503	11,700	2,279	11,920
Klobuchar	1,613	1,444	4,302	2,164	4,815
GIM	1,247	1,076	2,151	1,647	2,709
LPIM	0,856	0,831	2,039	1,193	2,362

Tabela 9 – EMQ diário para a solução PPP para o dia de baixa atividade solar.

2012_315	EMQ (m)				
Estratégias	DE	DN	DU	2D	3D
Sem Correção	1,383	2,419	10,740	2,786	11,095
Klobuchar	1,272	2,349	3,541	2,671	4,435
GIM	1,299	0,982	3,100	1,628	3,501
LPIM	1,306	0,870	2,590	1,569	3,028

Na Tabela 8, verifica-se que o EMQ 3D foi de 11,920 m para o caso de não correção do efeito da ionosfera e ao aplicar a correção da ionosfera o EMQ 3D teve uma melhoria, baixando para 4,815 m quando se utilizou o modelo de Klobuchar, aproximadamente 60%. No caso da aplicação do GIM, o EMQ 3D foi de 2,709 m e para o LPIM foi de 2,362 m, o que representa uma melhoria de aproximadamente 12% de melhoria quando aplicado o LPIM em relação o GIM.

Na Tabela 9, verifica-se que o EMQ 2D e 3D foi de 1,628 m e 3,501 m, respectivamente, para o caso da utilização do GIM. No caso da aplicação do LPIM, o EMQ 2D e 3D foi, respectivamente de 1,569 m e 3,028 m, o que representa uma melhoria de aproximadamente 4% e 14%, respectivamente ao aplicar o LPIM em relação ao GIM.

6.2 Avaliação dos modelos globais e regionais da ionosfera

Esta seção apresenta a avaliação da acurácia do posicionamento por ponto ao aplicar correções da ionosfera advindas dos mapas ionosféricos globais e regionais. O objetivo é avaliar o quanto de melhoria os mapas regionais proporcionam em relação aos mapas globais. Nos experimentos da seção 7.1, apenas o modelo funcional foi afetado quando aplicado às estratégias de correção da ionosfera, dessa forma foi proposto nesta seção (7.2) a modificação do modelo estocástico do ajustamento.

Para realizar a modificação do modelo estocástico e para a escolha da precisão da estimativa da ionosfera nos mapas de VTEC duas estratégias de peso foram adotadas nos processamentos dos dados, ou seja, aplicando o

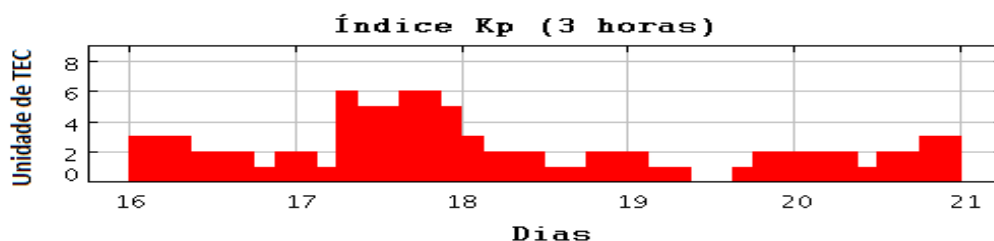
processamento com mesma estratégia de peso e com diferentes pesos para os casos dos diferentes mapas. Na primeira estratégia apenas o modelo funcional foi afetado e as precisões das coordenadas estimadas ficaram iguais, devido ao modelo estocástico não ser afetado. Na segunda estratégia foram adotadas precisões para as medidas da ionosfera para cada tipo de mapa utilizado. Nos experimentos dessa seção, os efeitos da troposfera foram corrigidos a partir do modelo de Hopfield e todas as correções do PPP foram aplicadas (ver Tabela 4).

6.2.1 Análise do PPP aplicando GIM e LPIM com mesma estratégia de peso

No caso deste experimento, os dados GPS foram processados no modo PPP (somente código) utilizando somente a precisão adotada pelo usuário para a montagem da matriz dos pesos, seja para o caso com correção ionosférica advinda do GIM ou do LPIM. Contudo, o valor da precisão é ponderado pelo inverso do seno do ângulo de elevação do satélite (ver seção 3.2). A precisão do código C/A neste caso foi adotada com valor de 0,80m.

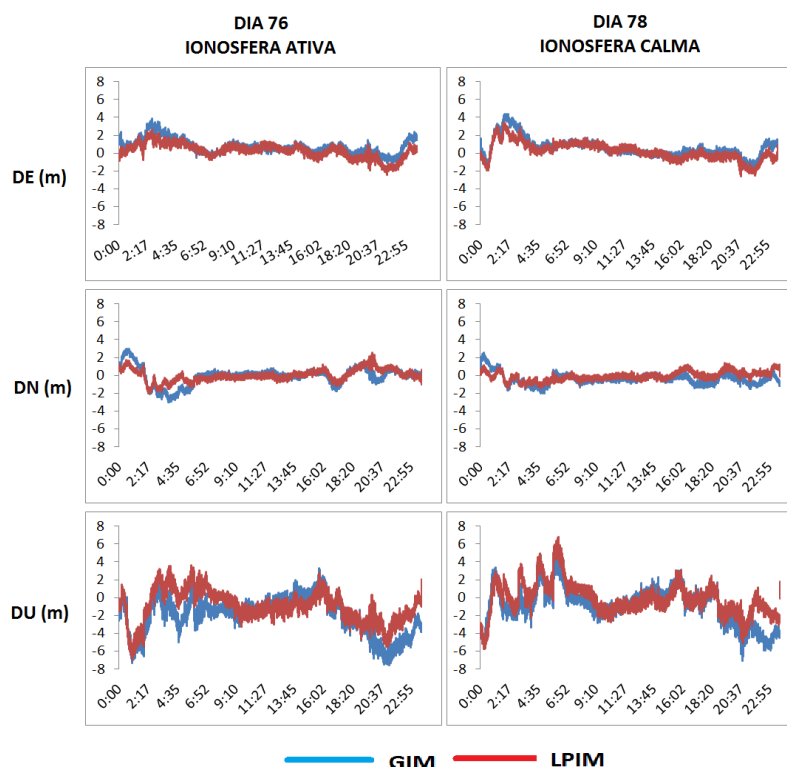
A Figura 18 mostra os erros no SGL (DE, DN e DU) para cada época processada com dados coletados na estação NAUS para os dias 76 (17/03/2013) e 78 (19/03/2013) de 2013, cujo índice KP que está relacionado com a atividade geomagnética, atingiu valores máximos, respectivamente de 6 (ionosfera ativa) e 2 (ionosfera calma) como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Índice Kp (atividade geomagnética) para os dias de março.



Fonte: Adaptado de <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/> (acesso em Jan. de 2013).

Figura 18 – Série temporal do erro diário em DE, DN e DU para a estação NAUS.



A partir da Figura 18 verifica-se que, em geral, a aplicação do LPIM forneceu menores erros no SGL para cada época processada nos dias 76 e 78 de 2013 sendo que a componente altimétrica (DU) da estação NAUS é a mais afetada. O EMQ diário para cada componente é apresentado na Tabela 10, juntamente com a melhoria em termos percentuais ao utilizar o LPIM ao invés do GIM para correção da ionosfera no posicionamento.

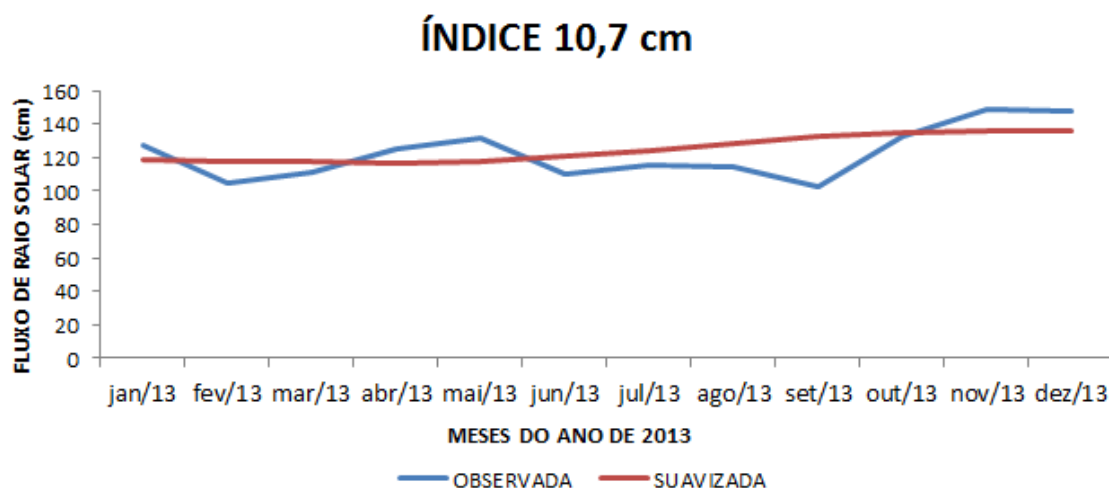
Tabela 10 – EMQ diário para os dias 76 e 78 na estação NAUS.

DIAS	MAPAS	DE (m)	DN (m)	DU (m)	2D (m)	3D (m)
DIA 76 IONOSFERA ATIVA	GIM	1,078	1,011	2,897	1,478	3,253
	LPIM	0,829	0,667	2,055	1,064	2,314
	MELHORIA (%)	23,097	34,037	29,069	28,014	28,850
DIA 78 IONOSFERA CALMA	GIM	1,206	0,740	2,186	1,415	2,604
	LPIM	1,002	0,493	1,822	1,117	2,137
	MELHORIA (%)	16,945	33,274	16,671	21,073	17,946

Verifica-se na Tabela 10 que ao aplicar à correção ionosférica advinda LPIM as melhorias diárias variaram de 23% (componente DE), 34% (componente DN) e 29% (componente DU) para o dia de ionosfera ativa e de 17% (DE), 33% (DN) e 17% (DU) para o dia de ionosfera calma. Para o caso da resultante 3D, os melhoramentos foram de aproximadamente 29% e 18%, respectivamente para os dias 76 e 78.

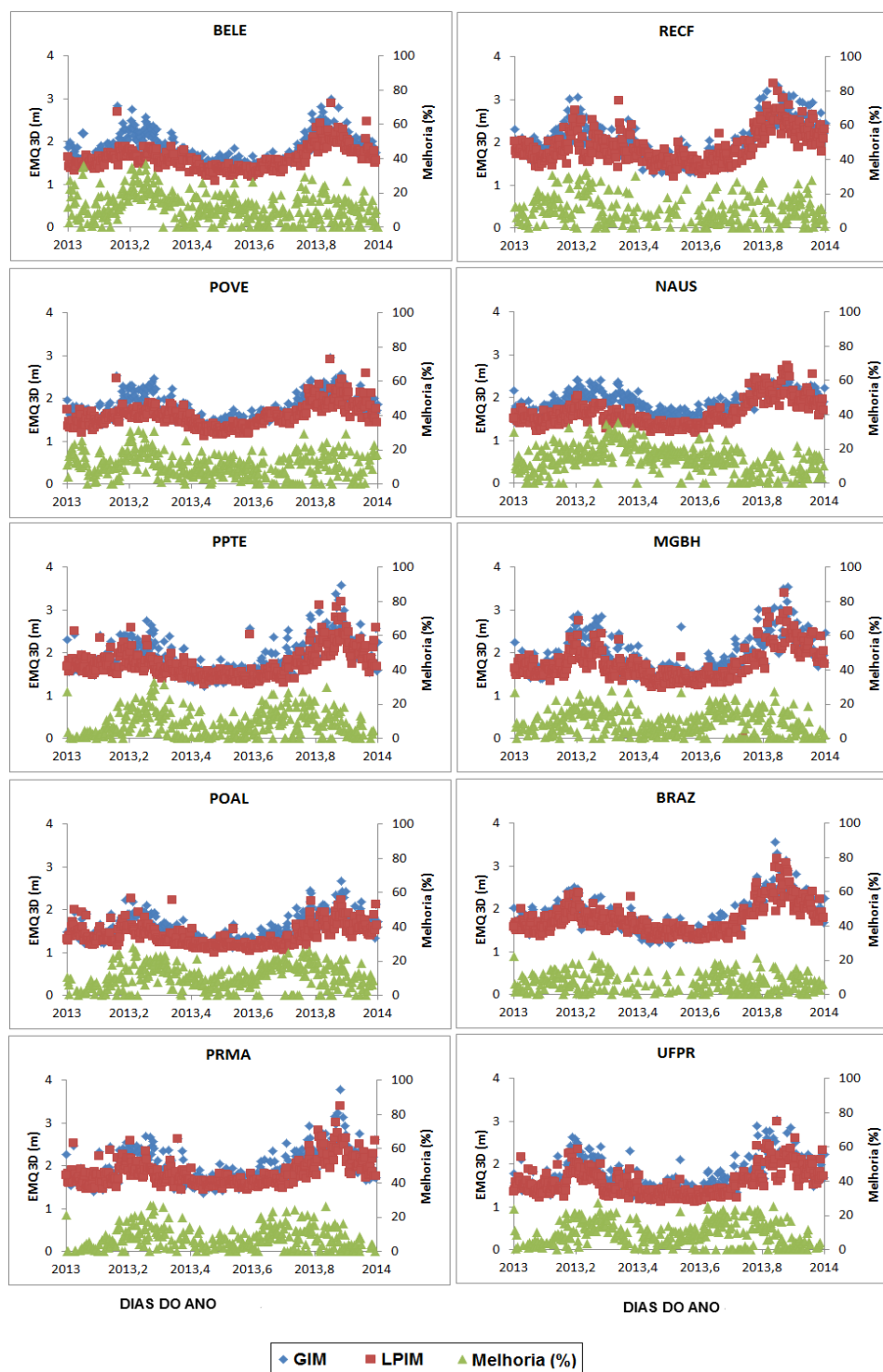
Analísado o melhoramento ao aplicar o LPIM em relação o GIM, foi realizado o processamento de dez estações da RBMC (BELE, RECF, POVE, NAUS, PPTE, MGBH, POAL, BRAZ, PRMA e UFPR) considerando dados do ano de 2013. A Figura 19 apresenta o fluxo de raio solar segundo o índice 10,7 cm para o ano de 2013.

Figura 19 – Índice 10,7 cm para todo ano de 2013.



A Figura 20 apresenta o EMQ 3D diário e o melhoramento do LPIM em relação ao GIM para o processamento de cada uma das estações escolhida. Os valores do EMQ 3D são mensurados no eixo y à esquerda, cujos valores estão em metros, e o eixo y da direita apresenta os valores de melhoria percentual.

Figura 20 – Série temporal do EMQ 3D e do melhoramento aplicando os mapas do GIM e LPIM sem ponderação.



Na Figura 20 verifica-se que, em geral, a aplicação do LPIM forneceu menores valores de EMQ 3D durante a maioria dos dias do ano de 2013. Nota-se o efeito sazonal na série temporal do EMQ 3D relacionado com as épocas do ano, onde os valores máximos podem ser observados nos meses de Fevereiro a Abril (Equinócio

de Outono) e de Setembro a Outubro (Equinócio de Primavera), que correspondem às estações do ano verão e primavera, respectivamente, enquanto que os valores mínimos podem ser observados entre os meses de Maio a Agosto (Solstício de Inverno), referente às estações de outono e inverno. Para os casos de máxima atividade solar ao longo do ano, os níveis de melhoria do LPIM em relação ao GIM são maiores atingindo a ordem de até 20%, para algumas estações. A Tabela 11 apresenta a média do EMQ 3D considerando todos os dias do ano 2013 (EMQ 3D anual), bem como a melhoria média e máxima ao longo do ano.

Tabela 11– EMQ 3D anual e melhoramento no posicionamento com aplicação do GIM e LPIM.

ESTAÇÃO	EMQ 3D MÉDIO (m)		MELHORIA MÉDIA (%)	MELHORIA MÁXIMA (%)
	GIM	LPIM		
BELE	1,839	1,605	12,728	37,007
BRAZ	1,840	1,761	4,264	22,707
MGBH	1,907	1,740	8,793	27,704
NAUS	1,900	1,650	13,136	35,582
POAL	1,561	1,400	10,321	27,877
POVE	1,788	1,600	10,559	31,174
PSTE	1,894	1,742	8,024	32,833
PRMA	2,035	1,834	9,844	27,123
RECF	2,031	1,897	6,640	32,515
UFPR	1,715	1,566	8,669	27,338

Pode-se observar na Tabela 11 que a melhoria máxima ao longo do ano de 2013 variou de aproximadamente 23% (BRAZ) a 37% (BELE). Na média as melhorias ao aplicar as correções do LPIM em relação ao GIM variaram de aproximadamente 4% (BRAZ) à 13% (NAUS). É importante destacar que dentre as estações que fazem parte da estimativa do VTEC no GIM, ou seja, estações BRAZ, POVE, RECF e UFPR, somente a estação BRAZ apresentou baixo nível médio anual de melhoria, atingindo aproximadamente 4%, porém com máxima melhoria anual de aproximadamente 23%.

No caso do processamento com a mesma estratégia de peso ao utilizar o GIM e LPIM, a estimativa de precisão das coordenadas obtidas a partir da Matriz de Variância e Covariância (MVC) dos parâmetros apresentam valores idênticos. Contudo, neste caso é necessário considerar que a MVC dos parâmetros é multiplicada pelo fator de variância a priori adotado, desde que o ajustamento seja aceito no teste estatístico Qui-quadrado, pois assim, pode-se considerar o fator de variância a priori estatisticamente igual ao fator de variância a posteriori. Com base nestas informações e no nível de melhoria no posicionamento proporcionado pelo uso do LPIM em relação ao GIM, os dados de quatro estações (NAUS, POAL, PPTE e RECF) foram processados considerando na modelagem estocástica a incerteza dos mapas da ionosfera (ver Equação 3.8 da seção 3.2), o que é apresentado na próxima seção.

6.2.2 Aplicação do GIM e LPIM no PPP considerando a incerteza do mapa ionosférico

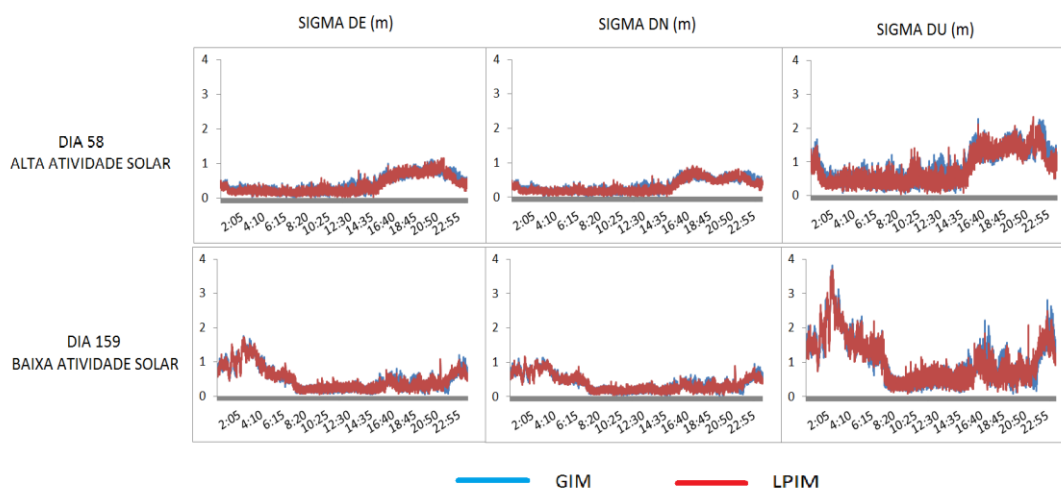
Os dados GPS de pseudodistâncias das estações NAUS, POAL, PPTE e RECF para o ano de 2013 foram processados no modo PPP (somente código) considerando a precisão das observações conforme apresentado na equação 3.8 (seção 3.2). Nesse caso, a precisão do código C/A foi adotada com valor fixo de 0,5 m e adicionada pelos valores de 0,7 TECU ($\sim 0,112$ m) e 0,6 TECU ($\sim 0,096$ m), respectivamente para a utilização do GIM e LPIM. Estes valores foram escolhidos de forma empírica após experimentos e considerou-se a precisão do LPIM em torno de 10% melhor que a precisão do GIM tendo em vista o nível médio anual de melhoramento apresentado no experimento da subseção 7.2.1. A Tabela 12 apresenta a média do EMQ 3D considerando todos os dias do ano 2013 (EMQ 3D anual), bem como o melhoramento médio e máximo ao longo do ano para o caso do processamento com diferentes estratégias de ponderação.

Tabela 12 – EMQ 3D anual (m) e o melhoramento (%) no PPP aplicando os mapas do GIM e LPIM.

ESTAÇÃO	EMQ 3D MÉDIO (m)		MELHORIA MÉDIA (%)	MELHORIA MÁXIMA (%)
	GIM	LPIM		
NAUS	1,894	1,639	13,461	35,603
POAL	1,563	1,400	10,453	28,032
PPTE	1,889	1,738	8,014	33,004
RECF	2,029	1,886	7,053	32,922

Ao comparar os valores do EMQ 3D médio obtido no processamento com ponderação (Tabela 12) e sem ponderação (Tabela 11), verifica-se que valores foram semelhantes apresentando valores pouco menores para o caso de ponderação. O nível de melhoria médio e máximo do LPIM em relação ao GIM no caso com ponderação também é bastante semelhante ao caso sem ponderação. A análise da precisão das coordenadas estimadas em cada época foi realizada para a estação NAUS considerando os dias 58 (ionosfera ativa) e 159 (ionosfera calma) de 2013. A MVC de parâmetros foi multiplicada pelo fator de variância a posteriori em cada época assumindo que o ajustamento foi aceito no teste estatístico Qui-quadrado. A Figura 21 apresenta a série temporal diária das precisões das coordenadas, as quais foram propagadas para o SGL.

Figura 21 – Serie temporal diária da precisão em DE, DN e DU para a estação NAUS no posicionamento com diferente estratégia de ponderação.



A Tabela 13 apresenta a média diária das precisões no SGL ao aplicar o GIM e LPIM no posicionamento com diferentes estratégias de ponderação, bem como as melhorias percentuais.

Tabela 13 – Precisões nas componentes DE, DN e DU (m) e o melhoramento (%) no PPP aplicando os mapas do GIM e LPIM.

ESTAÇÃO - NAUS	MAPAS	σ_{DE} (m)	σ_{DN} (m)	σ_{DU} (m)
DIA 58 ALTA ATIVIDADE SOLAR	GIM	0,507	0,398	1,065
	LPIM	0,500	0,392	1,047
	MELHORIA (%)	1,414	1,425	1,647
DIA 159 BAIXA ATIVIDADE SOLAR	GIM	0,412	0,338	0,869
	LPIM	0,386	0,315	0,808
	MELHORIA (%)	6,477	6,797	6,989

A partir dos resultados apresentados verifica-se que ao aplicar à correção ionosférica advinda do LPIM as melhorias nas precisões das coordenadas para o dia com ionosfera ativa (dia 58) foram de aproximadamente 1,41%, 1,42% e 1,66%, respectivamente para as componentes DE, DN e DU. No caso do dia com ionosfera mais calma (dia 159), os níveis de melhoria foram maiores atingindo valores de aproximadamente 6,48%, 6,8% e 6,99%, respectivamente para as componentes DE, DN e DU. A estratégia de ponderação aplicada especificamente para a utilização de cada mapa no processamento dos dados GPS é importante para o usuário que não disponha de coordenadas conhecidas da estação para avaliação, pois assim, será possível avaliar melhor a incerteza estimada das coordenadas. É importante ressaltar que este é o caso geral em que tais modelos serão utilizados.

6.3 Avaliação da estimativa dos efeitos residuais da ionosfera no PPP

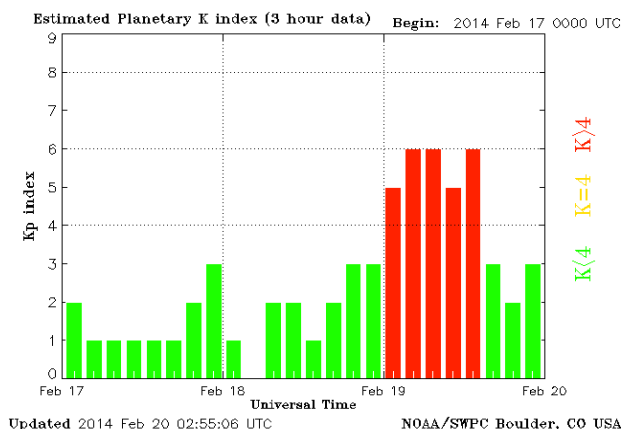
6.3.1 Análise do valor a priori e da incerteza da pseudo-observação da ionosfera

Nos experimentos para escolha e análise do valor a ser adotado para a precisão da pseudo-observação na estimativa dos efeitos residuais da ionosfera, foram processados dados GPS da estação BELE (Belém - PA) considerando o dia 19 de fevereiro de 2014. A escolha desse dia baseou-se na análise do índice

geomagnético Kp (Figura 22) onde o valor médio diário do índice foi igual a 5, de forma que a ionosfera pode ser classificada como ativa. O processamento foi realizado no RT_PPP, considerando dados de simples frequência (C/A e L1), no modo estático, adotando valores que variam de 0,005 m a 100m para a precisão da pseudo-observação.

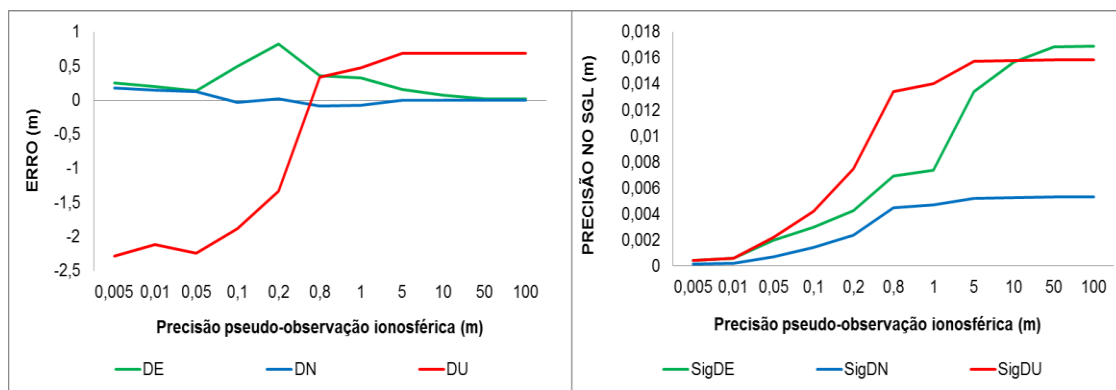
Para cada valor de precisão adotado, realizou-se processamento estático com solução diária.

Figura 22 – Índice Kp para o dia 19/02/2014.



A Figura 23 apresenta a precisão e erro das componentes planimétrica e altimétrica em função da precisão adotada para a pseudo-observação dos resíduos ionosféricos no PPP para dados de simples frequência.

Figura 23 – Erro e Precisão das componentes planimétrica e altimétrica em função da precisão da pseudo-observação ionosférica.



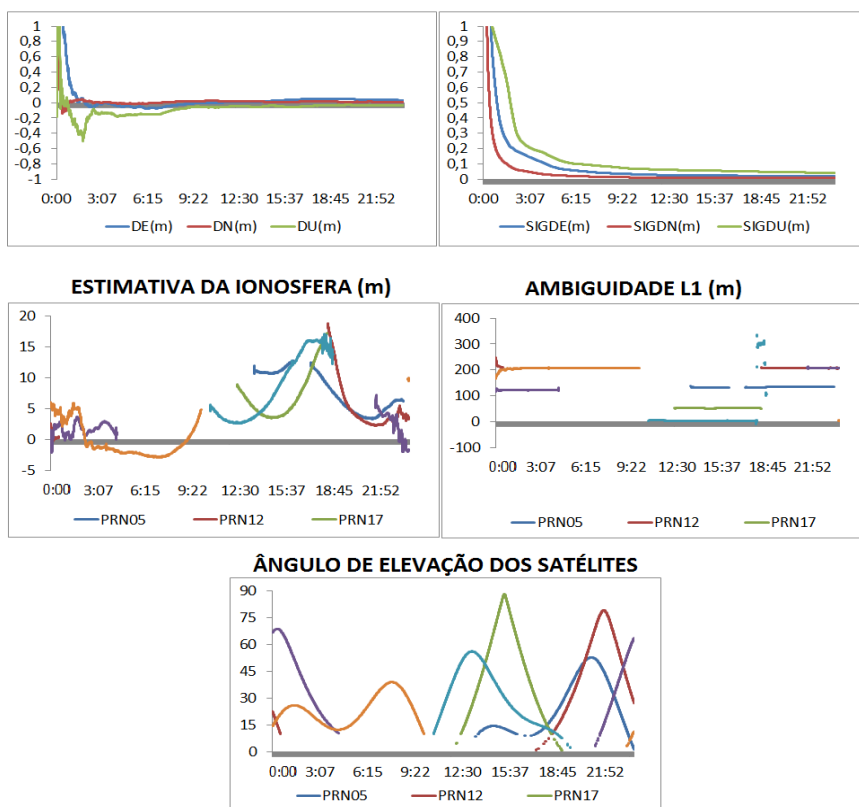
Na Figura 23 verifica-se na primeira série temporal (gráfico da esquerda) que quanto menor o valor da precisão para a pseudo-observação maior o erro no

posicionamento, principalmente a componente altimétrica. Na segunda série temporal (gráfico da direita) pode-se verificar que quanto menor o valor adotado para precisão melhor será a precisão das coordenadas estimadas, observando a Figura 23 a partir da precisão de 50 m os valores para os sigmas nas componentes do SGL tendem a se estabilizar em torno de um valor. Em relação ao erro das componentes DE, DN e DU, o valor do erro sofreu pouca variação para as componentes planimétrica, variando o erro de -0,1 m a 0,9 m. Para componente altimétrica a variação do erro foi bastante significativa, pois o erro que era de -2,5 m reduziu para 0,4 m quando adotada precisão a partir de 0,2 m.

O valor da pseudo-observação pode ser adotado a partir de um modelo de correção da ionosfera, neste caso, utilizou-se o modelo de Klobuchar. Experimentos com solução diária foram realizados considerando dados da estação RECF para o dia 01/01/2013, com a ionosfera calma. O valor da precisão adotada para a pseudo-observação foi igual a 50 metros.

A Figura 24 mostra os resultados obtidos no processamento da estação RECF, os erros e as precisões nas componentes planimétricas e altimétrica, a estimativa da ionosfera, as ambiguidades e o ângulo de elevação para cada satélite, considerando uma solução diária.

Figura 24 – Série temporal diária para estação RECF dos erros e precisão para as componentes planimétricas e altimétrica, a estimativa da ionosfera, ambiguidades na L1 e ângulo de elevação para cada satélite.



Analisando a Figura 24, tanto os erros no SGL quanto a precisão de cada componente (E, N e U) apresentaram convergência após aproximadamente 2 horas de dados coletados. Em relação ao efeito ionosférico estimado, observam-se valores negativos devido à estimativa da ionosfera também absorver os atrasos de *hardware* do receptor ou dos satélites, além dos efeitos não modelados. Comparando essa série temporal com a ambiguidade, saltos na estimativa são apresentados quando uma nova ambiguidade é inicializada, após alguns minutos de observação e verifica-se uma alta correlação do efeito ionosférico estimado com o ângulo de elevação do satélite, ou seja, quanto menor o ângulo de elevação maior o efeito da ionosfera. Como pode ser observada na Figura 24 na terceira e quinta série temporal (estimativa da ionosfera e ângulo de elevação dos satélites).

Dessa forma, para os experimentos aplicando a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera, foi adotada a precisão de 50 metros no ajustamento e para obter o valor da pseudo-observação foi adotado o modelo de Klobuchar, cujos experimentos

aplicando tal estratégia são apresentados na próxima subseção. É importante destacar que o RT_PPP utiliza o valor da pseudo-observação advinda do modelo de Klobuchar somente na primeira época de processamento ou quando os dados de um novo satélite passam a fazer parte do processamento. A partir daí os valores estimados na época serão utilizados como valores de pseudo-observação para a próxima época e um modelo de correlação tipo *white noise* é aplicado no filtro de Kalman.

6.3.2 Análise de séries temporais no PPP com a estimativa da ionosfera

Neste experimento, as observáveis GPS foram processadas utilizando a estratégia de estimativa da ionosfera para dados de receptores de simples frequência com observações de código (C/A) e fase (L1), além disso, foram realizados processamentos considerando a correção da ionosfera aplicando a combinação *ion-free*. Nos processamentos foram utilizados dados GPS de 4 estações da RBMC de forma a abranger as regiões geográficas do Brasil, sendo elas: BELE (Belém), PPTE (Presidente Prudente), POAL (Porto Alegre) e RECF (Recife) com dados coletados no ano de 2013. As séries temporais foram geradas no modo PPP estático com solução diária. O valor da pseudo-observação da ionosfera, bem como seu desvio padrão foi baseado nos experimentos apresentados na seção 7.3.1. As séries temporais dos “erros” nas componentes E (Este), N (Norte) e U (Altitude) para o processamento das quatro estações da RBMC considerando dados do ano de 2013 aplicando a combinação *ion-free* e estimativa da ionosfera são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Série temporal diária do erro nas componentes planimétricas e altimétrica aplicando a estimativa da ionosfera com precisão de 50 metros para a pseudo-observação advindo do modelo de Klobuchar.

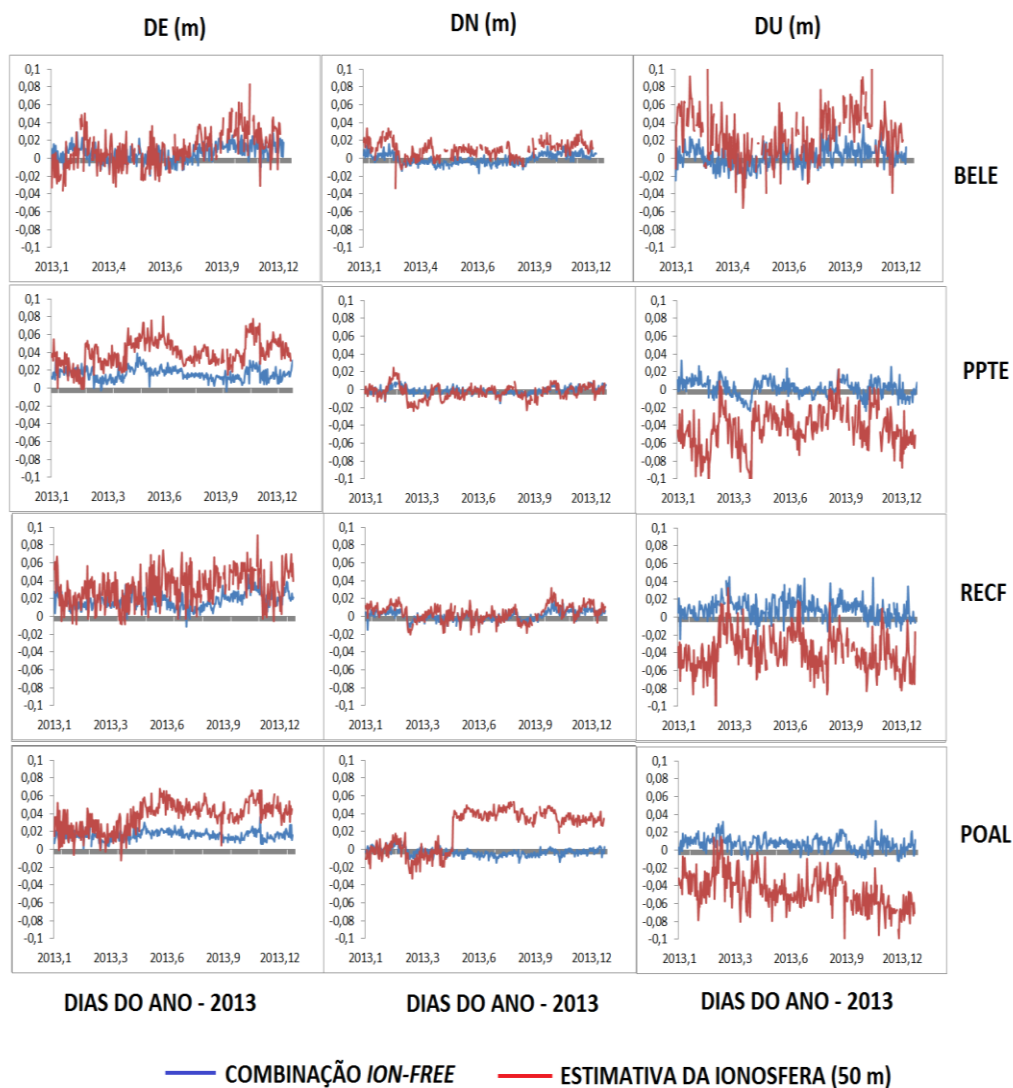


Tabela 14 – Média anual dos erros no SGL para as componentes DE, DN e DU em metros.

ESTAÇÃO	MÉDIA ANUAL DE (m)		MÉDIA ANUAL DN (m)		MÉDIA ANUAL DU (m)	
	Ion-free	Esti_50m	Ion-free	Esti_50m	Ion-free	Esti_50m
BELE	0,006	0,010	-0,001	0,009	0,001	0,025
PPTE	0,015	0,039	-0,001	-0,002	0,001	-0,043
RECF	0,017	0,032	0,001	0,003	0,009	-0,038
POAL	0,015	0,037	-0,002	0,022	0,007	-0,045

Analisando a Figura 25 e a Tabela 14, os comportamentos da série temporal aplicando as duas estratégias foram próximos na componente Norte (N), observando um efeito maior na componente altimétrica pra a estimativa da ionosfera, com valores para a estimativa na componente DU de 0,025m para BELE, -0,043m na PPTE, -0,038m para RECF e -0,045m na POAL.

A estação BELE obteve o menor erro nas 3 componentes quando comparado com as estações PPTE, RECF e POAL. Nessas três estações a deficiência dos modelos de correção da ionosfera degradou a componente Este (E) atingindo um erro médio de 0,036 m e a altitude (U) atingindo um erro médio de -0,042m.

Na estação POAL observa-se um deslocamento na série temporal da componente norte, relacionado com a mudança na orientação da antena do receptor no dia 14 de maio de 2013 (dia 134). A Figura 26 apresenta o relatório da estação POAL e a data da remoção e instalação da antena, a qual está relacionada com o deslocamento apresentado.

Figura 26 – Relatório da estação POAL (seção antena).

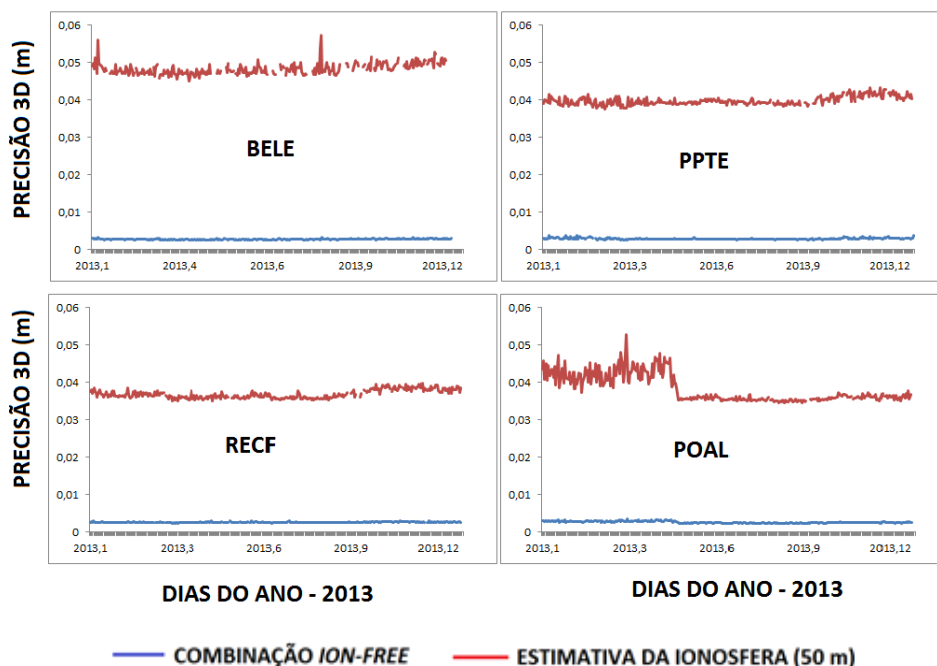
Tipo de Antena	- GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif
Número de Série	- 4951353663
Altura da Antena (m)	- 0,0075 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)
Data de Instalação	- 14/05/2013 às 15:02 UTC
Data de Remoção	- 05/05/2014 às 18:00 UTC

Tipo de Antena	- DORNE MARGOLIN T (TRM29659.00)
URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM29659.00%2BNONE.gif
Número de Série	- 107992
Altura da Antena (m)	- 0,0075 (distância vertical do topo do dispositivo de centragem forçada à base da antena)
Data de Instalação	- 11/09/2007 às 00:00 UTC
Data de Remoção	- 14/05/2013 às 15:02 UTC

Em todas as séries temporais apresentadas na Figura 25, onde foi aplicada a estimativa da ionosfera para dados de simples frequência com a precisão de 50 metros e o processamento aplicando a pseudo-observação advinda do modelo de Klobuchar, observa-se nas séries temporais um comportamento similar para todas as estações quando aplicado à combinação linear *ion-free*. Nas estações PPTE e RECF que quando comparado as duas estratégias de processamento o erro na componente Norte(N) entre a média anual da *ion-free* e a estimativa, na estação PPTE a diferença foi de 0,001 m e na RECF foi de 0,002m, além disso, destaca-se que a altura foi a componente mais afetada em ambos os experimentos.

A Figura 27 mostra a precisão 3D obtida nos processamentos das estações apresentadas na Figura 24.

Figura 27 – Série temporal anual da precisão 3D aplicando a estimativa da ionosfera e a combinação *ion-free*.



Analisando a Figura 27, a precisão da combinação *ion-free* foi da ordem de milímetros e para a estimativa da ionosfera foi da ordem de centímetros. Na estação POAL um salto na série temporal foi observado, esse salto está relacionado com a mudança de antena no receptor pertencente à RBMC. É importante lembrar que a precisão da *ion-free* é muito otimista quando comparado com as precisões da estimativa da ionosfera. No caso da estimativa modifica-se o modelo estocástico adotando valores de precisão para a pseudo-observação, algo que afeta a precisão estimada para as coordenadas.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a acurácia do PPP quando aplicado diferentes estratégias de correção da ionosfera, como o modelo de Klobuchar, os mapas globais e regionais e a estimativa dos efeitos residuais da ionosfera. Experimentos no PPP foram realizados considerando dados GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade ionosférica. Os resultados foram avaliados em termos de acurácia baseado no EMQ para os “erros” nas componentes planimétricas e altimétrica e em 2D e 3D, além da precisão da estimativa.

Foi realizada revisão bibliográfica relacionada à pesquisa abordando como a introdução do ajustamento, modelo matemático funcional e estocástico do método PPP, efeitos ionosféricos, modelos de correção da ionosfera no posicionamento GPS, bem como o histórico e características importantes de cada modelo.

A utilização dos mapas globais da ionosfera é limitada devida a resolução espacial e temporal de baixa latência e a baixa cobertura de estações para a América do Sul, o que não ocorre nos mapas regionais LPIM com resolução espacial de 1° em latitude e longitude e temporal de 1 hora com utilização de dados advindos de estações da rede SIRGAS.

A estratégia de estimativa do efeito residual da ionosfera no posicionamento PPP, também foi avaliada nesta pesquisa, bem como a modelagem matemática e estocástica considerando o parâmetro da ionosfera para cada direção satélite/receptor e o melhor valor a ser adotado para pseudo-observação.

Com a adaptação do RT_PPP para leitura dos mapas regionais, no caso o LPIM, experimentos com dados de simples frequência foram realizados aplicando os mapas globais e regionais, além do modelo de Klobuchar e o posicionamento sem correção da ionosfera.

Na seção 7.1 foram apresentados os resultados da avaliação dos modelos de correção da ionosfera no posicionamento com solução diária com geração de séries temporais para os anos de 2010 a 2012. Nos experimentos para o ano de 2010 a melhoria dos mapas regionais em relação ao modelo de Klobuchar foi de 43% DE,

49% para DN e 32% para DU; e com os mapas globais a melhoria quando aplicado os mapas regionais foi de 33% para DE, 31% para DN e 10% para DU. Quando comparado a solução diária aplicando os mapas globais e regionais, a melhoria foi de 47% na resultante 3D para o LPIM no ano de 2011 e no ano de 2012 a melhoria foi de 14% ao aplicar o LPIM em relação ao GIM.

Na seção 7.2 os experimentos tiveram como objetivo avaliar a acurácia do posicionamento absoluto com a aplicação das correções ionosféricas advindas de mapas globais (GIM) e regionais (LPIM), distintas estratégias de ponderações no processamento dos dados foi propostas, nas quais a incerteza da observável GPS é adicionada a incerteza do VTEC. Desta forma, as incertezas estimadas dos parâmetros são mais condizentes com a qualidade do mapa ionosférico que está sendo aplicado no posicionamento.

A análise diária considerando dados GPS da estação NAUS com o mesmo peso para os dias 76 (ionosfera ativa) e 78 (ionosfera calma) de 2013 mostrou que a aplicação do LPIM proporcionou melhorias de aproximadamente 29% e 17% na componente altimétrica (DU), em relação ao GIM. Para o EMQ 3D diário as melhorias com a utilização do LPIM em relação o GIM foram de aproximadamente 29% e 18%, respectivamente, para os dias 76 e 78.

No caso do processamento para as dez estações com mesmo peso no ano de 2013, a aplicação da correção ionosférica advinda do LPIM proporcionou melhoria máxima anual em termos de EMQ 3D variando de aproximadamente 22% (estação BRAZ) até 37% (estação BELE) e na média o melhoramento foi de até aproximadamente 13% para o caso da estação NAUS.

Ao considerar a incerteza do VTEC do GIM ou do LPIM na modelagem estocástica do posicionamento, a melhoria no EMQ 3D médio anual do LPIM em relação ao GIM variou de 4% a 13%, respectivamente para as estações BRAZ e NAUS. A precisão adotada para o VTEC após diversos experimentos foi de 0,6 e 0,7 TECU, respectivamente para o LPIM e GIM, o que representa algo em torno de 10% melhor no caso da precisão do LPIM em relação ao GIM. É importante considerar que as precisões de VTEC são mapeadas para a direção receptor satélite e adicionadas à precisão fixa da observável, a qual recebe uma ponderação pela função inverso do seno do ângulo de elevação do satélite. Neste caso, a estimativa

da precisão das coordenadas foi analisada para os dias alta e baixa atividade solar em 2013 na estação NAUS e as melhorias no uso do LPIM em relação ao GIM foram de aproximadamente 2% e 7% na componente altimétrica (σ_{DU}), respectivamente para os dias 58 e 159.

Com base nos experimentos realizados nesta seção conclui-se que a utilização dos mapas regionais proporciona melhorias significativas em relação ao uso de mapas globais no posicionamento absoluto com máxima anual acima de 30% e em média de aproximadamente 10%.

A introdução de incertezas dos mapas regionais e globais proporciona ao usuário GPS valores mais realísticos da qualidade dos parâmetros, o que é fundamental para as mais diversas aplicações, uma vez que os usuários não dispõem de coordenadas conhecidas da estação para realizar suas análises.

Na seção 7.3 foram apresentados resultados e análises dos processamentos envolvendo dados de 4 estações aplicando a estratégia de estimativa dos efeitos residuais da ionosfera para dados de simples frequência, adotando a precisão de 50 metros e a pseudo-observação advinda do modelo de Klobuchar e aplicação da combinação linear *ion-free*. O comportamento das séries temporais aplicando à estimativa da ionosfera e a combinação *ion-free*, foram similares ao longo do ano de 2013, onde os erros nas componentes planimétricas e altimétrica não ultrapassaram 0,049 m para a estimativa da ionosfera.

Sendo assim, pode-se concluir que a estimativa da ionosfera no processamento dos dados GPS produziu melhores resultados além de ser uma técnica que proporciona boa acurácia quando comparado com a combinação linear *ion-free*, com a grande vantagem de preservar as características inteiras das ambiguidades.

7.2 Recomendações

Como recomendação para trabalhos futuros podem ser realizados experimentos aplicando os mapas globais e regionais de correção da ionosfera corrigindo os atrasos de *hardware* dos satélites e das estações que são informados apenas no GIM (DCB). Além disso, novos estudos sobre as precisões de VTEC fornecidos pelos mapas ionosféricos podem ser realizados. No que concerne a aplicação do LPIM é interessante que a GESA disponibilize os DCBs nos arquivos horários juntamente com os valores de VTEC de forma a tornar o posicionamento mais realísticos.

Em relação a estimativa da ionosfera, recomenda-se considerar as observáveis de código e fase na portadora L2 e adaptar para estimativa considerando os novos sinais do GPS e futuramente os demais sistemas de posicionamento. É interessante realizar experimentos para determinar precisões para a pseudo-observação, levando em consideração a localização da estação GPS, a atividade ionosfera e a precisão da pseudo-observação com relação ao modelo utilizado.

Além disso, recomendam-se trabalhos aplicando além da estimativa da ionosfera, a solução fixa das ambiguidades de forma a proporcionar soluções mais próximas das obtidas pela combinação *ion-free*.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SALAM, M.A. **Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations**. Calgary:University of Calgary, PhD Thesis,2005.

AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion)**: Implementação em Tempo Real. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

ALVES, C. M. D. **Solução de ambiguidades GPS no Posicionamento por ponto preciso utilizando uma rede de estações**. 163 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

BRUNINI, C., MEZA, A., GENDE, M., AZPILICUETA, F., South American regional ionospheric maps computed by GESA: a pilot service in the framework of SIRGAS, **Advances in Space Research** (2008), doi: 10.1016/j.asr.2007.08.041

CAI, C. **Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements**. 153 p. Department of geomatics Engineering Calgary, Alberta, PhD Thesis. august, 2009.

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

CODE **Center for Orbit Determination in Europe, Astronomy Institute University of Berne (AIUB)**. <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>. Acesso em: Dezembro de 2014.

CPLAT (**Centro de Processamento de La Plata**) – SIRGAS. 2015. <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/> . Acesso: Abril de 2015.

CHEN, K.; GAO, Y. **Real-Time Precise Point Positioning Using Single Frequency Data**. Proceedings of ION GNSS-2005, September 2005, Long Beach, CA,pp.1514-1523.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based augmentation system availability. **Radio Science**. vol. 37, 2002.

DACH, R. et al. (Ed.). **Bernese GPS software version 5.0**: user manual. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.

DAVIES, K. **Ionospheric radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

FONSECA JUNIOR, E.S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 176p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GAO, Y.; GARIN, L. J. Precise Point Positioning and Its Challenges, Aided-GNSS and Signal Tracking. In: **GNSS Solution**. 2006.

GELB, A.; KASPER JR., J. F.; NASH JR., R. A.; PRICE, C. F.; SUTHERLAND JR., A. A. **Applied optimal estimation**. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press, 1974. 374p.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações – Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 1994. 319p.

GENG, J.; TEFERLE, F. N.; MENG, X.; DODSON, A. H. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. **Advances in Space Research** 47: 1664 – 1673. 2011.

GENG, J.; BOCK, Y. Triple-frequency GPS precise point positioning ambiguity resolution. **Journal Geodesy** 87: 449 - 460. 2013.

GOAD, C. Surveying with the Global Positioning System. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JR., J. J. **Global Positioning System**: Theory and applications. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v. 2, Cap. 18, p.501-517.

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. & COLLINS, J., 1998. **GPS Theory and Practice**. Springer-Verlag, Wien New York, 4th ed.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. 2001. **GNSS - Global Navigation Satellite System**. Springer-Verlag, Wien New York.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geociências/Geodésia. **Manual IBGE-PPP**. Disponível em: http://www.ppp.ibge.gov.br/manual_ppp.pdf. Acesso em: Jan/2014

Internacional GNSS Service, 2014. **Products IGS**. Disponível em: <<http://www.rtigs.net>>. Acesso em: janeiro de 2014.

IGS - **International GNSS Service**. Disponível em:<<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: Dez. 2014.

IGS-RTPPP, 2014. **RTPPP: Real Time Pilot Project**. Disponível em: <<http://www.rtigs.net>>. Acesso em: janeiro de 2014

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial)**. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/>. Acesso em: jan./2014.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric Effects on GPS (Chapter 12). In: Parkinson, B. W.; Spilker, J. J. ed. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington: AIAA, v.1, 1996. (Progress in Astronautics and Aeronautics, 163).

_____. **Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users**. IEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v. AES-23, nº 3, p. 325 – 332, 1987.

LEANDRO, R. F. **Precise Point Positioning With GPS: A New Approach for Positioning, Atmospheric Studies and Signal Analysis**. 2009. PhD Thesis - University of New Brunswick, Canadá. 2009.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 435 p. 3ª. ed.: New York: John Wiley & Sons, 2004.

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

LIU, G. C. **Ionosphere weighted global positioning system carrier phase ambiguity resolution**. 2001 157 f. M.Sc. dissertation. Department of Geomatics Engineering – The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

MACALALAD, E. P.; TSAI, L. C.; WU, J.; CHAO, H. L. Application of the Taiwan Ionospheric Model to single-frequency ionospheric delay corrections for GPS positioning. **Journal GPS Solutions**; vol. 17, pages 337-346. 2012.

MACHADO, W. C. **Utilização de redes neurais artificiais na previsão do VTEC visando a geração de estações de referência virtuais em tempo real.** 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

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.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

_____. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS.** 245 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; SILVA, H. A.; ROCHA, G. D. C. **Estimativa dos efeitos da ionosfera no Posicionamento por Ponto Preciso GNSS para a região brasileira considerando as condições de cintilação ionosférica.** Projeto de Pesquisa. Edital MCTI/CNPq - 14/2013.

MARQUES, H.A.; MONICO, J. F.G.; AQUINO, M.; ROSA, G. P. Dos S. **Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no Posicionamento GNSS no Brasil.** Revista Brasileira de Geofísica (2009) 27(3): 357-374.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para modelagem do efeito da refração ionosférica na propagação dos sinais GPS.** 164 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2003.

_____. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira.** 264 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

MATSUOKA, M. T; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando o modelo de Klobuchar e o modelo regional da ionosfera: Avaliação da performance no

posicionamento por ponto. **Anais** do Simpósio Brasileiro de Geomática, p. 052-060. Presidente Prudente – SP, 9 – 13 de Julho de 2002.

MATSUOKA, M. T; COLLISCHONN, C; CAMARGO, P. O. **Análise do desempenho do modelo global da ionosfera do IGS no posicionamento por ponto durante períodos de tempestades geomagnéticas**: estudo do caso para 29-30 de outubro de 2003 na região sul do Brasil. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife-PE, 27-30 de julho de 2010.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 287 p. 1ª ed. São Paulo: UNESP, 2000.

_____. **Posicionamento pelo GNSS**: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 476 p. 2ª ed. São Paulo: UNESP, 2008.

MONICO, J. F. G.; DE FRANCESCHI, G.; BOUGARD, B., AQUINO, M., SOLEY M. CIGALA: an FP7 innovative activity to tackle the threat of ionospheric scintillation to GNSS operations in Latin America. In: **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 64/6. 2012.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. **Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 15, nº 3, p. 469-483, jul-set, 2009.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (EUA) (NASA). **Model Ionosphere**. Disponível em: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/ionos/ionos_index.html>. Acesso em: Setembro 2014.

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

SALOMONI, C. S. **GPS E IONOSFERA: Estudo do comportamento do TEC e de sua influência no posicionamento com GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar**. 166 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós- Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a Geodésia e a Meteorologia.** 200 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

SCHAER, GURTNER, **IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1.** ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 1998.

SCHAER, S. **Mapping and predicting the earth's ionosphere using the Global Positioning System.** 1999. 205p. Ph.D. dissertation. University of Bern, Bern, Switzerland.

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

SHOENEMANN, E. **Analysis of GNSS raw observations in PPP solutions.** Phd. 133 p. Technische Universität Darmstadt. 2014.

SILVA, H. A. **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS.** 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2009.

SIRGAS - **SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS.** 2014. Disponível em: <http://www.sirgas.org>. Acesso: jan/2014.

TEUNISSEN, P. J. G. **Dynamic data processing:** Recursive least-squares. Delft University Press, 2001.

VAN BREE, R. J.P.; TIBERIUS, C. C. J. M. **Real-time single-frequency precise point Positioning: Accuracy assessment.** GPS Solution. nº 16, p.259-266. 2012.

VERONEZ, M. R. **Proposta de um modelo regional da ionosfera para redução do efeito sistemático da ionosfera através do método sequencial de ajustamento.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

WILSON, B.; YINGER, C.; FEES, W. SHANK, C.; **New and Improved: The Broadcast Interfrequency Biases,** In: GPS World, USA, v.10 n.9, p. 56-66, set., 1999.

ANEXO A – Modelo de Klobuchar

O modelo de Klobuchar, também conhecido como modelo *broadcast* permite calcular o atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica entre o satélite e o receptor. Este modelo foi desenvolvido por Klobuchar (1987), sendo que os coeficientes do modelo matemático envolvidos são transmitidos com as mensagens de navegação.

O algoritmo empregado para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L1, além de oito coeficientes α_i e β_i ($i = 0, 1, 2$ e 3) que representam a amplitude do atraso vertical e o período do modelo respectivamente. O modelo também utiliza a latitude (φ) e a longitude (λ) geodésica da estação, o azimute (AZ) geodésico e o ângulo de elevação (el) do satélite e o tempo GPS (T_{GPS}) da época de observação.

Para descrever a variação da ionosfera durante o dia, o modelo utiliza-se da função co-seno com amplitude máxima às 14:00 horário local. A amplitude (A) e o período (P) da função co-seno são calculados em função da latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos pelos satélites e representados por um polinômio de 3º grau (LEICK, 1995).

Durante a noite, o atraso ionosférico em L1 é considerado constante (DC) e igual a 5 nanosegundos, que equivale, aproximadamente, a 1,5 metros ou 9,24 unidades de TEC (TECU) sendo que $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ (CAMARGO, 1999).

As unidades angulares utilizadas nos cálculos são dadas em semicírculos ($1\text{SC} = 180^\circ$), enquanto a do tempo GPS, em segundos.

A sequência do cálculo para obter a correção é geralmente dividida em etapas, tais como (LEICK, 1995):

a) Cálculo da latitude geocêntrica (Ψ)

$$\Psi = \frac{0,0137}{\text{el} + 0,11} - 0,022 \quad (\text{A.1})$$

onde Ψ corresponde ao ângulo formado entre os vetores satélite/receptor e satélite/centro de massa da Terra.

b) Cálculo da latitude do ponto ionosférico (φ_{IP})

$$\varphi_{IP} = \begin{cases} \varphi + \Psi * \cos(AZ), & \text{se } |\varphi_{IP}| \leq 0,416 \\ 0,416, & \text{se } \varphi_{IP} > 0,416 \\ -0,416, & \text{se } \varphi_{IP} < -0,416 \end{cases} \quad (A.2)$$

O ponto ionosférico corresponde ao ponto formado pela interseção do vetor satélite/ antena receptora e a camada ionosférica de altitude média igual a Hm . O modelo de Klobuchar adota-se Hm igual a 350 km.

c) Cálculo da longitude do ponto ionosférico (λ_{IP})

$$\lambda_{IP} = \lambda + \frac{\varphi * \sin(AZ)}{\cos(\varphi_{IP})} \quad (A.3)$$

d) Cálculo da latitude geomagnética do ponto ionosférico (ϕ_m)

$$\phi_m = \varphi_{IP} + 0,064 * \cos(\lambda_{IP} - 1,617) \quad (A.4)$$

e) Cálculo da hora local (t) do ponto ionosférico

$$t = \begin{cases} \lambda_{IP} * 4,32 \times 10^4 + T_{GPS}, & \text{se } 0 \leq t < 86400; \\ \lambda_{IP} * 4,32 \times 10^4 + T_{GPS} - 86400, & \text{se } t \geq 86400; \\ \lambda_{IP} * 4,32 \times 10^4 + T_{GPS} + 86400, & \text{se } t < 0. \end{cases} \quad (A.5)$$

Onde T_{GPS} corresponde ao tempo GPS da época de observação.

f) Cálculo da função de mapeamento (SF)

$$SF = 1 + 16 * (0,53 - el)^3 \quad (A.6)$$

g) Cálculo do período do modelo (P)

$$P = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n, & \text{se } P \geq 72000; \\ 72000, & \text{se } P < 72000. \end{cases} \quad (A.7)$$

h) Cálculo da fase em radianos (X)

$$X = \frac{2\pi * (t - 14 * 3600)}{P} \quad (A.8)$$

i) Cálculo da amplitude do modelo (A)

$$A = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_m^n, & \text{se } A \geq 0; \\ 0, & \text{se } A < 0. \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

j) Cálculo da correção ionosférica, ao longo do caminho satélite/receptor na portadora L1 (I_{L1}^S)

$$I_{L1}^S = \begin{cases} c * SF[DC + A * \cos(x)], & \text{se } |x| < 1,57; \\ c * SF * (DC), & \text{se } |x| > 1,57. \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

Sendo, c a velocidade da luz no vácuo.

Vale ressaltar que o modelo de Klobuchar compensa em torno de 50 a 60% do efeito da ionosfera e, portanto, é inadequado para modelar flutuações diárias da ionosfera e outras anomalias.