

MAYARA COBACHO ORTEGA CALDEIRA

**ANÁLISE DO IMPACTO DO EFEITO IONOSFÉRICO E
CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO POSICIONAMENTO
BASEADO EM REDES E POR PONTO**

MAYARA COBACHO ORTEGA CALDEIRA

**Análise do Impacto do Efeito Ionosférico e Cintilação Ionosférica
no Posicionamento Baseado em Redes e Por Ponto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" financiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), para a obtenção do Título de Mestre.

DANIELE BARROCA MARRA ALVES

Orientadora

CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR

Coorientador

Presidente Prudente

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

- C151a Caldeira, Mayara Cobacho Ortega.
Análise do impacto do efeito ionosférico e cintilação ionosférica no Posicionamento em Redes e Por Ponto / Mayara Cobacho Ortega Caldeira. - Presidente Prudente : [s.n.], 2016
122 f.
- Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves
Coorientador: Claudinei Rodrigues de Aguiar
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia
1. Ionosfera. 2. Posicionamento em rede. 3. IONEX e modelos ionosféricos. 4. Cintilação ionosférica. I. Alves, Daniele Barroca Marra. II. Aguiar, Claudinei Rodrigues. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR
(COORDENADOR)

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CHAVES
(UNESP/FCT)

Prof. Dr. WILLIAM RODRIGO DAL POZ
(UFV)

MAYARA COBACHO ORTEGA

Presidente Prudente (SP), 11 de fevereiro de 2016.

Resultado: Aprovado

DEDICATÓRIA

À *Deus*, que foi por Ele e graças à Ele.

Aos melhores pais, *Joaquim Ortega dos Santos e Marly Aparecida Cobacho Ortega*, que são meu alicerce, que me apoiam e incentivam independente da situação. Pai e Mãe, vocês tem uma filha Mestra!

À minha maravilhosa e companheira irmã, *Priscila Cobacho Ortega Bianchi*, juntamente com seu esposo *Luciano Bianchi*, pela amizade, sinceridade, carinho e apoio.

Ao meu amado, *Carlos Rodrigo Tanajura Caldeira*, que está sempre ao meu lado com inestimável dedicação e compreensão. Caminhando lado a lado, enfrentamos todos os desafios e barreiras. Amor, Conseguimos!

Ao amigos(as) e familiares que diretamente ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminhos nas horas incertas e suprir todas as minhas necessidades. Obrigada por todas as vezes que foi meu refúgio e proteção, por ter me abençoado com novo sonho quando já havia desistido de lutar, por me amar e agraciar mesmo nos momentos em que não mereço, obrigada por ter me ouvido mesmo ficando calada, por sempre escolher o certo e o melhor para minha vida, embora à princípio na minha pequenez humana não ter compreendido seus projetos... Te amo, Senhor, e somente o Senhor me bastaria!

Aos meus pais Joaquim e Marly, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade, que iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação para que os trilhasse sem medo e cheios de esperanças. Doaram-se por inteiros e renunciaram aos seus sonhos, para que, muitas vezes, pudesse realizar os meus. Obrigada pelo incentivo e apoio, mesmo não entendendo nada de Geodésia, Ionosfera, GNSS..... Agradeço pela confiança deposita em mim e por me dar colo e carinho todos os dias, pelos conselhos e entusiasmo quando tudo parecia dar errado. E por me acalmar sempre com a simples frase: "Filha, confie em Deus, vai dar tudo certo!"

À minha irmã Priscila e seu esposo Luciano que sempre estão presentes nas vitórias e nos tropeços, sem vocês nenhuma conquista seria alcançada. E a todos os meus familiares, avós, tios e primos que indiretamente ajudaram a conquistar meu sonho.

Ao meu Grande amor, Carlos Rodrigo, por estar ao meu lado desde a graduação, me apoiando nos momentos mais desesperadores, obrigada por crescer junto comigo e a conquistar todas as vitórias lado a lado. Obrigada por me ensinar e me fazer sorrir, por me fazer entender que em alguns momentos só basta estar ali ao lado sem dizer uma palavra, e me mostrar que um abraço cura, reconstrói e dá forças. Obrigada pelas conversas, pelos carinhos, pelos estudos compartilhados, pela amizade e principalmente por ser exatamente como você é. Além disso, obrigado por me presentear com uma nova família, Dona Roseli, Carlos Alberto, Marielle, Daniela e Pedro e todos da Família Borges e Caldeira.

À orientadora e amiga, Professora Dani, agradeço imensamente por tua paciência, compreensão, ensinamentos, dedicação e por todas as nossas conversas e desabafos. Obrigada pela confiança, motivação e conselhos, por saber lidar com meu jeito desesperador e destrambelhado. Obrigada pelas oportunidades que a senhora me proporcionou, que talvez possam ser as únicas em minha vida. Obrigada por demonstrar seu

instinto de "mãe" e amiga dos seus orientandos, defendendo-os a todo custo. Ao meu Co-Orientador, Profº Claudinei Rodrigues de Aguiar pelos ensinamentos, confiança, auxílio e ao fornecimento dos arquivos desta dissertação.

Aos Geodésicos e parceiros Daniel e Nemer que compartilharam os ensinamentos, disciplinas, estudos, dúvidas ao longo deste período, sem eles o caminho certamente seria mais difícil. A todos os colegas de pós-graduação, mas especialmente a Nariane, Mariana Chaves, Stela, Alisson, Fernanda, Gabriel por sempre estar dispostos a ajudar e ouvir, tanto assunto referente a pesquisa quanto pessoal. As amigas irmãs, Heloísa Victorino e Nathália Ferreira, obrigado por sempre estarem ao meu lado, me apoiando e, por todos os momentos compartilhados, conversas, emoções e conselhos. Provando que a distância não importa, não abala, e não é pretexto para desmanchar uma amizade verdadeira.

Ao membro do GEGE, sobretudo a Tayná, Hérica, Gabriela, Crislaine, Ítalo, Rogério, Vani, Stuaní e o Prol, pelos ensinamentos nas áreas específicas de Geodésia, Computação, Matemática... e por todo o crescimento que compartilhamos juntos. Agradeço especialmente a garota do *software* R e de *wavelets*, Gabriela, e a Hérica, Mauro, Viviane, Paulo Sérgio e Tayná pela protidão em ajudar, socorrer e ensinar.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Cartografia, que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, bem como a Professora Eniuce Menezes de Souza por seus esclarecimentos estatísticos. Ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas e a UNESP pelo suporte acadêmico e científico.

À banca de qualificação e da defesa final, João Carlos Chaves e William Rodrigo Dal Poz, pelas sugestões e inúmeras contribuições científicas para desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante os dois primeiros meses do mestrado e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP- Processo 2014/03858-9), pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço ao IBGE, LPIM, ao projeto CALIBRA e MIMOSA pelo fornecimento dos dados.

EPÍGRAFE

"Deus dá ânimo ao cansado e recupera a força do enfraquecido. Até os jovens se fatigam e cansam, tropeçam e caem, mas os que confiam no Senhor renovam suas forças, criam asas como Águias, correm e não se fatigam, podem andar que não cansam."

Isaías 40, 29ss

RESUMO

Visando usufruir do potencial dos sistemas de posicionamento global existentes, novos métodos de posicionamento têm surgido e outros vêm sendo aprimorados. Uma grande tendência nos últimos anos tem sido o uso de redes de estações GNSS de referência. Mas, tanto no uso de redes como nos demais métodos, um fator importante para melhorar a qualidade do posicionamento está relacionado com a modelagem atmosférica. Especial atenção deve ser dada aos erros que ocorrem devido à ionosfera, pois ela se tornou a principal fonte de erro no posicionamento GNSS, após desativação da técnica SA. Este erro é diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. O TEC e, consequentemente, o erro ionosférico variam no tempo e no espaço, e sofrem diversas influências, como: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica, atividade geomagnética, entre outros. Atualmente, os erros proporcionados pela ionosfera podem ter seus efeitos minimizados a partir de arquivos IONEX ou por meio de modelagem ionosférica. Portanto, nesta pesquisa, foram utilizados dados das estações da RBMC em diferentes regiões do Brasil no período de baixa e alta densidade de elétrons do pico solar 24 para avaliar o desempenho dos mapas ionosféricos, no posicionamento baseado em redes, disponibilizados por diversos centros (CODE, ESA, JPL, UPC e IGS), bem como os fornecidos pelo projeto MIMOSA, e também os modelos de Grade (AGUIAR, 2010) e estimativa de TEC. Para tal fim, foi adotado um sistema computacional desenvolvido na FCT/UNESP, denominado VRS-Unesp, que emprega o conceito de Estação Virtual. De acordo com os resultados obtidos, nota-se que não há um único mapa fornecido pelos centros de análise do IGS que melhor se enquadra a realidade brasileira, além disso, o desempenho do mapa depende das condições ionosféricas e, principalmente, da localização da estação. Além disso, verificou-se que a acurácia obtida pelo IONEX do projeto MIMOSA, pelo modelo de grade e de Estimativa do TEC que utilizam dados regionais e possuem maior resolução espacial e temporal, foram os que apresentaram os melhores resultados. Por fim foi avaliada a correlação entre a acurácia do posicionamento por ponto e o índice de cintilação S4, já que a ionosfera pode não apenas degradar a acurácia do posicionamento GNSS como reduzir sua disponibilidade, pois existe uma alta dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas. Como resultado, considerando a análise de espaço-frequência em relação ao tempo pelo método coerência wavelets para avaliação da correlação da série, nota-se uma correlação no período do equinócio superior a 70%.

Palavras-chave: Efeitos Ionosféricos. Cintilação Ionosférica. Posicionamento baseado em redes. Atividade Solar.

ABSTRACT

In order to take advantage from global positioning systems, new positioning methods have emerged and others have been improved. An important tendency in recent years has been the use of GNSS reference stations networks. But, using networks or other positioning methods an important factor to improve the positioning quality is related to atmospheric modeling. Special attention should be given to errors that occur due to ionosphere, it became the largest error source in GNSS positioning after disabling SA technique. Ionosphere error depends on signal frequency and Total Electron Content (TEC) in the ionospheric layer. TEC and consequently the ionospheric error varies regularly in time and space and they are affected by different sources like: sunspot number (solar cycle), season, local time, geographic position, geomagnetic activity, and others. Currently, the errors provided by the ionosphere can be minimized using IONEX files or models. Therefore, in this research, the RBMC stations data were used in different regions of Brazil in the period of low and high electron density of the cycle solar 24 to evaluate the performance of the ionospheric maps, in network-based positioning, available from several centers, as CODE , ESA, JPL, UPC and IGS, as well as those provided by the MIMOSA project, and also the Grade Models (AGUIAR, 2010) and TEC Estimates. For this, a computer system developed in FCT / UNESP has been adopted, RSV-Unesp that uses the concept of Virtual Station. According to the results, we note that there is not single map of IGS analysis centers that best fits the Brazilian reality, moreover, the map performance depends on the ionospheric conditions and, primarily, the station location. Moreover, it was found that the accuracy obtained by IONEX the MIMOSA project, the Grade Model and TEC estimation using regional data and have higher spatial and temporal resolution, showed the best results. Finally we evaluated the correlation between the accuracy of point positioning and scintillation index S4, since the ionosphere can not only degrade the accuracy of GNSS positioning as well as reduce its availability, because there is a high dependency between signal loss and ionospheric irregularities. As result, considering the space-frequency analysis with respect to time by the wavelet coherence method for evaluation of the correlation of the series, there is a correlation in the period of higher equinox to 70%.

Keywords: Ionospheric effects. Ionospheric scintillation. Network-Based Positioning. Solar Activity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–Estações GNSS da RBMC	25
Figura 2–Estações GNSS da rede GNSS/SP	26
Figura 3 – Infraestrutura do Posicionamento em Redes.....	27
Figura 4 – Conceito de Estação de Referencia Virtual (VRS)	28
Figura 5– Representação das camadas ionosféricas	32
Figura 6 – Geometria da trajetória do sinal GNSS.....	36
Figura 7 – Variação Diurna do VTEC.....	37
Figura 8 – Variação Sazonal do TEC (a) o VTEC referente à Julho e (b) VTEC de Outubro.	38
Figura 9 – Imagem da superfície do Sol mostrando algumas manchas solares	39
Figura10 – Ciclos Solares de 11 anos desde 1700 até 2015.....	39
Figura 11 – Predição do número de manchas para o Ciclo 24 e o ciclo anterior (a) em 2007 e (b) em 2015.....	40
Figura 12 – Representação do número de Manchas Solares mês a mês entre 1610 e 1750.....	40
Figura 13 – ECM capturada por imagem do LASCO/SoHO	43
Figura 14 – Explosão solar em escala	44
Figura 15– Regiões Geográficas da Ionosfera.....	41
Figura 16 – Campo magnético da Terra (dipolo)	45
Figura 17 – Linhas de força sendo comprimidas após eventos solares	46
Figura 18 – As fases da Curva Dst dos dias 5–8 de setembro de 1982.....	47
Figura 19 – Anomalia Equatorial	49
Figura 20– Localização da AMAS, em vermelho	50
Figura 21– Impacto da Cintilação Ionosférica no Sinal GNSS.....	50
Figura 22 – (a) Índice de Cintilação S4 e (b) Erro do posicionamento	51
Figura 23 – Bolhas Ionosféricas	52
Figura 24 – Raio de Busca do IPPs	60
Figura 25 –Geometria do GNSS utilizada naTomografia Computadorizada da Ionosfera.....	62
Figura 26 – Estações da rede CALIBRA/CIGALA (a), com destaque as estações próximas da	65
Figura 27 – Quantidade diária de Manchas Solares do Hemisfério Sul em 2014.....	66
Figura 28 – Índice de Cintilação S4 Médio de 2014 das estações pertencentes a Rede CIGALA/CALIBRA	67
Figura 29 – VTEC considerando máscara de elevação maior que 10° em Fevereiro (a), Outubro (b), Junho (c)e Julho(d).....	68
Figura 30 – Localização Aproximada das Sub–redese das VRS.....	71
Figura 31 – Índices Geomagnéticos: Kp (a) e DST (b); e Índice de Cintilação Ionosférica S4 (c) e VTEC (d)	74
Figura 32 – Rede CIGALA/CALIBRA e a localização da estação PRU2.....	75
Figura 33 – EMQ 3D do PPP (em m)diário da região Nordeste para período de Alta (a) e	77
Figura 34 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons.....	78

Figura 35 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons.....	79
Figura 36 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons	79
Figura 37 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons.....	80
Figura 38 – Índice de Cintilação S4 no período de Fevereiro (a), Outubro(b), Junho (c) e....	83
Figura 39 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta (a) e baixa (b) atividade ionosférica de 2014 para região Nordeste	84
Figura 40 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta (a) e baixa (b) atividade ionosférica de 2014 para região Norte	84
Figura 41 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta (a) e baixa (b) atividade ionosférica de 2014 para região Sul	84
Figura 42 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta (a) e baixa (b) atividade ionosférica de 2014 para região Sudeste	85
Figura 43 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta (a) e baixa (b) atividade ionosférica de 2014 para região Central.....	85
Figura 44 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Nordeste para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)	88
Figura 45 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Nordeste para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b).....	89
Figura 46 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)	89
Figura 47 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b).....	90
Figura 48 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)	91
Figura 49 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b).....	91
Figura 50 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)	92
Figura 51 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)	93
Figura 52 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)	93

Figura 53 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b).....	94
Figura 54– EMQ 3D do PPP no modo Cinemático das Estratégias de Estudo (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b) em 2014.....	98
Figura 55– EMQ 3D do PPP no modo Cinemático das Estratégias de Estudo (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b) em 2015.....	98
Figura 56 – EMQ 3D época por época no modo Estático (a) e no modo cinemático (b)do dia 10 de Abril de 2014.....	100
Figura 57 – Quantidade de Satélites Rastreados x Quantidade de satélites em que o VTEC não é disponibilizado.....	102
Figura 58 – Índice de Cintilação S4 médio diário da estação POAL	103
Figura 59 – Índice de Cintilação S4 médio diário da estação PALM	103
Figura 60 – Índice de Cintilação S4 médio diário da estação PRU2.....	103
Figura 61 – EMQ 3D do PP modo Estático e o índice de cintilação S4 > 0,5 médio da estação POAL.....	104
Figura 62 –EMQ 3D do PP modo Estático e o índice de cintilação S4 > 0,5médioda estação PALM.....	104
Figura 63 – EMQ 3D do PP modo Estático e o índice de cintilaçãoS4 > 0,5 médioda estação PRU2	105
Figura 64 – Mapa de Cores da Coerência <i>Wavelets</i> de 2012 (a) e 2014 (b) da estação PRU2.....	106
Figura 65 – Mapa de Cores da Coerência <i>Wavelets</i> de 2012 (a) e 2014 (b) da estação PALM.....	107
Figura 66 – Quantidade de dados de cintilação (S4 >0,5) empregados por dia para o cálculo da média ponderada das estações PRU2(a), PALM(b) e POAL (c).....	110
Figura 67 – Ocorrência de manchas solares em 2012 à 2014 (média Mensal)	111

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos.....	19
1.2	Justificativa	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Posicionamento Absoluto	22
2.2	Posicionamento Baseado em Redes.....	24
2.2.1	Geração dos dados da VRS	28
2.3	Ionosfera e seus efeitos no posicionamento GNSS.....	32
2.3.1	Variações do Conteúdo Total de Elétrons (TEC)	37
2.3.1.1	Variações Temporais.....	37
2.3.1.3	Variação Espacial.....	41
2.3.1.2	Eventos Solares	42
2.3.1.4	Campo Magnético	44
2.3.1.5	Irregularidades da Ionosfera.....	48
2.4	Mitigação Ionosférica	54
2.4.1	Modelos matemáticos que utilizam coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação	55
2.4.2	Mapas Ionosféricos.....	56
2.4.3	Modelos Empíricos.....	58
2.4.4	Modelos Bidimensionais	59
2.4.5	Modelos Tridimensionais	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3. 1	Materiais e Softwares	63
3. 2	Métodos	64
3.2.1	Emprego dos Mapas Globais da Ionosfera no posicionamento baseado em redes.....	65
3.2.2	Comparação entre os modelos ionosféricos de estudo	70
3.2.2.1	Comparação entre os modelos de estimativa do TEC, Mapas Globais Ionosféricos e o modelo de Grade.	70

3.2.2.2 Comparação entre os Mapas Globais da Ionosfera do IGS e os Mapas do projeto MIMOSA.	72
3.2.3 Desempenho do posicionamento sob influência da cintilação ionosférica no Brasil.....	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1 Avaliação da performance dos Mapas Globais da Ionosfera no posicionamento baseado em redes.....	77
4.2 Análise dos modelos empregados no posicionamento baseado em redes – Modelo de estimativa do TEC, Mapas Ionosféricos e o modelo de Grade.....	87
4.2.1 Análise do modelo de estimativa do TEC, Mapas Globais Ionosféricos e o modelo de Grade no posicionamento em Redes.....	87
4.2.2 Análise dos Mapas Ionosféricos Globais e do projeto MIMOSA	97
4.3 Avaliação do desempenho do posicionamento sob influência da cintilação Ionosférica	102
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS e RECOMENDAÇÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as tecnologias espaciais têm sido amplamente empregadas, dentre elas uma das principais e mais modernas é o GNSS (Global Navigation Satellite System). O GNSS apresenta como características a dispensa de visibilidade entre as estações, obtenção das coordenadas em um curto período de tempo e disponibilidade de uso em qualquer condição climática, sendo que seu princípio básico consiste na medida de distância entre a antena do receptor e no mínimo quatro satélites. Este número mínimo de satélites permite que se realize posicionamento em tempo real, já que determina além das três coordenadas do ponto de interesse, o erro do relógio do receptor do usuário (MONICO, 2008; SEEGER, 2003; LEICK, 1995).

Dentre os vários sistemas de posicionamento que integram o GNSS, o que ainda possui maior destaque é o sistema norte americano GPS (*Global Position System*) (MONICO, 2008; ALVES 2011), embora a constelação russa, GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*), já esteja completa e os sistemas europeu e chinês, Galileo e Beidou, respectivamente, já estejam lançando satélites com o objetivo de tornar o sistema operacional na próxima década. Tem-se, também, os sistemas de aumento como WAAS (*Wide Area Augmentation System*) nos Estados Unidos, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) na Europa, o GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Satellite Navigation*) na Índia, MSAS (*MTSAT Satellite Augmentation System*) no Japão, entre outros.

No entanto, os dados transmitidos pelos sistemas GNSS estão sujeitos a erros, tanto devido aos próprios satélites que compõem as constelações, como a propagação do sinal, receptor e à estação. A maior parte desses erros pode ser eliminada, reduzida ou modelada. Isso depende muito do método de posicionamento empregado e da própria acurácia almejada (MONICO, 2008; SEEGER, 2003).

O posicionamento utilizando GNSS pode ser realizado na forma absoluta, relativa, diferencial (DGPS – *Differential GPS*) ou ainda em redes. No posicionamento por ponto ou absoluto, necessita-se de apenas um receptor, e a posição do ponto é determinada em tempo real ou pós-processada (MONICO, 2008; MARQUES, 2012). No que concerne ao posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação à de outro(s), cujas coordenadas são conhecidas (SEEGER, 2003). No DGPS, um receptor é estacionado numa estação de referência onde são calculadas correções de coordenadas ou de pseudodistâncias, as quais são transmitidas, em intervalos pré-estabelecidos, para os usuários da estação de interesse

(DALBELO, 2010). Empregando o conceito de redes, os erros são modelados na área de abrangência da mesma e as correções da rede são enviadas ao usuário (ALVES, 2008).

Com o intuito de usufruir do potencial do GNSS, os métodos de posicionamento vêm se aprimorando. Um dos métodos mais empregados visando alta acurácia e produtividade é o posicionamento relativo cinemático em tempo real, denominado *Real-Time Kinematic* (RTK), sendo capaz de alcançar acurácia centimétrica. Este método é baseado no uso de uma única estação de referência localizada nas proximidades do receptor móvel (MONICO, 2008). Entretanto, em razão dos erros envolvidos no processo, como efeitos atmosféricos (ionosfera e troposfera), órbita dos satélites entre outros, os quais são correlacionados espacialmente, o RTK fica restrito a aplicações com distâncias inferiores a 20 km entre a estação-base e a estação-móvel, dependendo, principalmente, das condições ionosféricas (MONICO, 2008; ALVES, 2008). Para superar este problema, vem sendo empregado o conceito de rede de estações de referência, denominado RTK em Rede ou, simplesmente, posicionamento baseado em redes, devido à necessidade de uma melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento e navegação (ALVES, 2011). Na FCT/UNESP, vem sendo desenvolvido um sistema de caráter científico para realizar RTK em Rede que utiliza o conceito de VRS (*Virtual Reference Station*) no modo pós-processado, denominado VRS– Unesp (ALVES, 2011). Mas, assim como em todos os outros métodos de posicionamento, a ionosfera deve ser modelada de forma adequada para que o posicionamento em redes possa atender a acurácia centimétrica almejada.

A ionosfera tornou-se a principal fonte de erro sistemático no posicionamento GNSS para receptores de uma frequência, após a desativação da técnica SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva) em dois de maio de 2000. Essa técnica manipulava as mensagens de navegação e a frequência dos relógios dos satélites, deteriorando a acurácia do posicionamento (MONICO, 2008; MATSUOKA, 2007; SEEGER, 2003).

A magnitude do erro devido o efeito ionosférico nos sinais GNSS depende diretamente do Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presente ao longo da trajetória percorrida pelo sinal, que por sua vez está relacionado ao processo de ionização na ionosfera, e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal (MATSUOKA, 2007; CAMARGO, 1999). O TEC e, conseqüentemente, o erro ionosférico variam no tempo e no espaço, e sofre diversas influências, como: ciclo solar (aproximadamente 11 anos); estação do

ano; hora local; localização geográfica; atividade geomagnética; entre outros. Além disso, a ionosfera pode não apenas degradar a acurácia do posicionamento GPS como reduzir sua disponibilidade, pois existe uma alta dependência entre perdas do sinal e irregularidades ionosféricas. Outro aspecto importante, é que durante a atividade solar máxima e para satélites próximos ao horizonte, o erro pode ser maior que 100 m, devido à redução na velocidade da modulação emitida pelos satélites GPS (MATSUOKA, 2007; LEICK, 1995). Além disso, a alta atividade ionosférica intensifica o efeito do eletrojato no equador geomagnético aumentando a magnitude da anomalia equatorial, bem como amplificando as irregularidades ionosféricas (DAVIES, 1990; AGUIAR, 2010; MENDONÇA, 2013).

No entanto, o TEC na ionosfera não é obtido diretamente pelas medidas do GNSS, mas ele pode ser estimado pela diferença das frequências, já que a ionosfera é dispersiva, e o índice de refração depende da frequência da onda de rádio. Estudos mostraram que o TEC, além de influências temporais e espaciais já mencionadas, apresenta um erro sistemático ou tendência inter-frequência (IFB – *Inter-Frequency Bias*, ou podendo ser denominada de DCB – *Differential Code Biases*), que é produzido pelo atraso no caminho do sinal GNSS ao percorrer o *hardware* do satélite e do receptor, onde ainda inclui-se o caminho percorrido no cabo que conecta a antena ao receptor (CAMARGO, PEREIRA e ARANA, 2012; CHOI et al., 2013, ARIKAN et al, 2008; HONG, 2007).

Neste sentido, torna-se importante entender a teoria sobre o comportamento da ionosfera, as diversas variações e distúrbios na densidade de elétrons, entre outros fatores, visando compreender as limitações causadas pela ionosfera na qualidade do posicionamento (VAN DIERENDONK, 2001; SKONE, 2000; DE PAULA et al., 2008).

Os receptores GPS de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato do mesmo ser dependente da frequência do sinal, através da combinação *Ion-free*. Além disso, vários modelos foram e ainda vêm sendo desenvolvidos para mitigar os efeitos da ionosfera para melhorar a acurácia do posicionamento, como o modelo de Klobuchar (KLOBUCHAR, 1996), NeQuick (RADICELLA, 2009), os GIMs (Mapas Globais da Ionosfera), modelos regionais (CAMARGO, 1999 – Mod_Ion), modelos de Grade (AGUIAR, 2010), entre outros.

Desse modo, esta pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica sobre a ionosfera e irregularidades ionosféricas, bem como seus efeitos no posicionamento. Além disso,

cita alguns modelos desenvolvidos por diversos autores para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera a fim de melhorar a acurácia do posicionamento. Deste modo, destaca-se a importância em desenvolver a presente proposta de pesquisa, pois além de atuar na realização de análises referentes ao efeito da ionosfera e cintilação ionosférica no posicionamento, também integra e dá continuidade a estudos associados a diversos outros projetos em execução no país.

1.1 Objetivos

Esse projeto de pesquisa tem como objetivo principal a utilização de dados GPS de estações de referência, para realizar estudos relativos aos efeitos ionosféricos e suas irregularidades no posicionamento baseado em redes de estações de referência. Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar o desempenho do posicionamento baseado em redes no período de máxima atividade solar no Brasil;
- Empregar e avaliar o modelo ionosférico baseado em grade desenvolvido por Aguiar (2010) (coorientador do projeto) no sistema em desenvolvimento, VRS–Unesp, para reduzir o efeito ionosférico no posicionamento baseado em redes;
- Realizar melhorias e avaliar o modelo de estimativa do TEC e efeito ionosférico implementado no sistema em desenvolvimento, VRS–Unesp;
- Empregar os Mapas Globais da Ionosfera, disponibilizados por diversos centros, como IGS (*International GNSS Service*), CODE, ESA, UPC, JPL no posicionamento baseado em redes, VRS–Unesp, na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar;
- Avaliar a magnitude da cintilação ionosférica no Brasil e o desempenho do posicionamento sob sua influência;
- Avaliar a influência de severas tempestades geomagnéticas no posicionamento na região brasileira.

Além disso, de uma forma geral, pretende-se, também, contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico nacional, visto que a modelagem atmosférica é de extrema importância para realizar posicionamento acurado e o Brasil, por estar localizado em região equatorial e de baixa latitude, está sob grande influência da atividade ionosférica,

possuindo, portanto, um vasto campo para pesquisas nessa área. Além disso, o RTK em rede pode ser utilizado em inúmeras aplicações.

1.2 Justificativa

Desde 2004, a orientadora desse projeto investiga, desenvolve e avalia o posicionamento baseado em redes, inicialmente com a pesquisa de doutorado (Processo FAPESP: 2003/12771-0) e posteriormente pós-doutorado (Processo FAPESP: 2008/06499-9), que finalizou em 12/2011. No decorrer desses projetos foi desenvolvido um sistema que realiza o RTK em rede com estimativa do TEC, que utiliza o conceito de VRS, denominado Sistema VRS-Unesp. Deste modo, neste projeto foi empregado no sistema VRS-Unesp o modelo de grade ionosférica desenvolvido pelo coorientador desta pesquisa em seu doutorado (AGUIAR, 2010), esse modelo foi analisado principalmente no pico (2014) da atividade ionosférica do ciclo 24 (Figura 13 (b)), assim como, outros métodos de mitigagem ionosférica, a fim de verificar qual melhor modelo ionosférico a ser empregado no conceito de VRS em condições atmosféricas brasileiras. Deste modo, uma das principais justificativas desse projeto é dar continuidade e contribuir para estudos relacionados ao RTK em rede no Brasil.

Outra justificativa se refere ao fato de que a maior parte do território brasileiro está localizada na região próxima ao equador geomagnético, e em região onde se localiza a anomalia equatorial ($\pm 20^\circ$ de latitude Geomagnética), sendo esta a mais crítica para o posicionamento, devido à ionosfera. Além disso, especialmente nos anos de 2013 e 2014 (referente ao pico solar do ciclo 24), ocorreu o pico de atividade ionosférica, tornando este período ideal para testar os modelos ionosféricos, visto que no pico anterior (ano de 2001 – ciclo 23) não havia disponível a atual configuração de redes de estações de referência existente no Brasil. É necessário salientar, que a alta atividade ionosférica deverá intensificar o efeito do eletrojato no equador geomagnético, aumentando a magnitude da anomalia equatorial, bem como amplificar as irregularidades ionosféricas, dentre elas a cintilação ionosférica.

Outro ponto importante, que também justifica a execução desse projeto, é o fato de que o tema central está associado a diversos outros com apoio financeiro das agências brasileiras de fomento à pesquisa. Dentre eles, pode-se citar o projeto Regular FAPESP intitulado "Avaliação robusta do impacto da modelagem atmosférica no Posicionamento Baseado

em Redes" processo 2012/19906–7, o projeto Universal CNPq intitulado "Análise da Cintilação e Demais Efeitos Ionosféricos no Posicionamento GNSS" processo 470112/2012–3, ambos coordenados pela orientadora desse projeto. Tem-se, ainda, o projeto internacional MIMOSA (*Monitoring the Ionosphere Over South America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*), nos quais a orientadora foi integrante. Este último fornece um banco de dados que permite avaliar a cintilação ionosférica no Brasil através de índices de irregularidades obtidos por receptores da rede CALIBRA em território nacional (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/cigala/>). Além disso, esse projeto de mestrado está vinculado ao projeto Universal denominado “Monitoramento da Ionosfera em Quase Tempo Real a partir de Redes GNSS NTRIP” (Processo 483954/2011–0) liderado pelo coorientador do projeto.

Finalizando, a realização de pesquisas, que visam estudar o comportamento do TEC e consequentemente do erro devido à ionosfera no Brasil, são muito importantes, pois tratam-se de trabalhos complexos devido aos diversos fatores que influenciam a variação do TEC, além das particularidades presentes na região brasileira. Estudos desta natureza podem auxiliar a comunidade geodésica, e demais usuários do GNSS, no entendimento das limitações impostas pela ionosfera, possibilitando um melhor planejamento das suas atividades e auxiliando na análise de seus resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, são abordados os métodos de posicionamento GNSS, absoluto e baseado em redes, mais especificamente o conceito de VRS. Posteriormente, são apresentados aspectos da ionosfera e seus efeitos no posicionamento, e alguns métodos empregados para mitigação ionosférica, como os modelos de Klobuchar, NeQuik, os Mapas Ionosféricos, modelos empíricos, modelos bidimensionais e tridimensionais.

2.1 Posicionamento Absoluto

O posicionamento absoluto, também denominado Posicionamento por Ponto (PP), refere-se à obtenção da posição em tempo real de uma estação com base em observações de pseudodistância derivada do código civil C/A modulado na fase da onda portadora L1. Neste posicionamento, necessita-se apenas de um receptor, e a posição é determinada no referencial vinculado ao sistema que está sendo utilizado, por exemplo, no caso do GPS utiliza-se o WGS84 e no GLONASS, o PZ90 (MONICO, 2008; SEEBER, 2003; MARQUES, 2012).

Este método de posicionamento tem sido empregado em navegação de baixa precisão e em levantamentos expeditos. Monico (2008) destaca que mesmo se a coleta de dados, sobre um ponto estacionário, fosse de longa duração, a qualidade dos resultados não melhoraria de modo significativo, em razão dos vários erros sistemáticos envolvidos na observável utilizada (pseudodistância) e a acurácia dos parâmetros transmitidos na mensagem de navegação. Acrescenta-se, a esses erros, aqueles advindos da refração troposférica e ionosférica e multicaminho do sinal, entre outros.

Para os casos em que não há necessidade de posicionamento em tempo real, ou seja, no caso em que as observações podem ser pós-processadas, é possível utilizar as efemérides precisas e as correções do relógio dos satélites estimadas pelo IGS (*International GNSS Service*), ambas com precisão muito melhor. Este método é denominado Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Atualmente, o IGS produz três tipos de efemérides e correção para os relógios dos satélites: IGS (final) apresentando acurácia melhor que 2,5 cm em posição e um EMQ de 75 ± 20 ps (pico segundo) para correção do erro do relógio, disponível com um latência de 12–18 dias; IGR (rápidas), apresenta um nível similar ao das efemérides IGS, porém com EMQ de 75 ± 25 ps

para correção do erro do relógio e com latência de 17 – 41 horas; e por fim a IGU (ultra-rápidas), composta de uma parte determinada com base nos dados (disponível com latência de 3–9 horas com acurácia de 3 cm em posição e EMQ de 150 ± 50 ps nas correções dos relógios) e outra predita (disponível em tempo real com acurácia em posição da ordem de 5 cm e EMQ de $3\pm 1,5$ ns (nanosegundo) nas correções dos relógios) (IGS, 2016).

Atualmente, em muitas pesquisas nota-se esforços da comunidade científica para aprimorar a estrutura para a realização do PPP em tempo real, como o Projeto Piloto do IGS (*IGS-RTPP Pilot Project* - <http://www.rtgis.net>), Projeto GNSS em tempo real da EUREF (*European Reference Frame*- http://www.epncb.oma.be/euref_IP/). Além disso, existem várias localidades ao redor do mundo (*mountpoints*) transmitindo correções de órbitas e relógios dos satélites em tempo real (MARQUES, 2012).

No que diz respeito às observáveis envolvidas no PPP, é comum que se utilizem dados de receptores de dupla frequência, muito embora o uso de dados de uma frequência também tenha sido inserido nesse método. No primeiro caso, a observável *ion-free* é utilizada, tanto para a fase quanto para a pseudodistância, no segundo, é comum empregar algum modelo para reduzir os efeitos da ionosfera (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Marques (2012) afirma que no PPP, quando os erros forem adequadamente tratados e/ou modelados e se for usado um período longo de observações de receptores de dupla frequência, pode-se apresentar grande potencialidade para ser empregado em aplicações que exigem alta acurácia.

É importante destacar que algumas organizações têm disponibilizado serviços de PPP *online*. Uma delas é o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que disponibiliza um serviço gratuito para pós-processamento de dados GNSS, denominado IBGE-PPP, disponível em <http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>, permitindo aos usuários obterem coordenadas em SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e em ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) de boa precisão. O IBGE-PPP processa dados GPS nos modos estático ou cinemático de receptores de uma ou dupla frequência. Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System*) desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* (NRCan).

2.2 Posicionamento Baseado em Redes

Os dados do posicionamento relativo cinemático podem ser processados após a coleta (modo pós-processado), ou, durante a própria coleta (em tempo real). O posicionamento relativo cinemático em tempo real, denominado RTK, é baseado no uso de uma única estação de referência localizada nas proximidades do receptor móvel. Porém, em razão dos erros envolvidos no processo, como efeitos atmosféricos (ionosfera e troposfera), órbita dos satélites e outros, os quais são dependentes do comprimento da linha-base, ou seja, correlacionados espacialmente, fica-se restrito a aplicações com distâncias inferiores a 20 km entre a estação-base e a estação-móvel, dependendo das condições ionosféricas.

Deste modo, para superar este problema foi desenvolvido o conceito de rede de estações de referência, denominado por muitos autores de RTK em rede, devido à necessidade de uma melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento e navegação (ALVES, 2008; FOTOPOULOS, 2000; ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

Para levantamentos que requerem acurácia centimétrica em distâncias de dezenas de quilômetros são utilizadas múltiplas estações de referência, que podem variar de três à centenas de estações, com isso, a área de abrangência onde o usuário poderá atuar será muito maior (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

Para realizar o posicionamento GNSS baseado em redes em tempo real, necessita-se da comunicação entre as estações de referência e o usuário. Uma possibilidade é a utilização de rádios comunicadores para a transmissão das correções ou dados, no entanto, isso limitaria a distância entre a estação de referência e o usuário. Dessa forma, atualmente existe a possibilidade de se utilizar a *internet* para a transmissão das correções, neste caso, não haverá limitação quanto a distância para a transmissão dos dados. Uma grande tendência nos dias atuais é a utilização do protocolo *Network of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP) para transmissão de dados GNSS via *internet*.

Uma das principais vantagens dos usuários de redes de estações de referência, quando comparado a usuários de uma simples linha de base, é o aumento na confiabilidade e disponibilidade do serviço, pois se uma ou duas estações de referência falham ao mesmo tempo (por qualquer motivo), as estações de referência remanescentes ainda seriam capazes de prover aos usuários as correções (ALVES, 2008; FOTOPOULOS, 2000).

Além disso, segundo Alves (2008), o uso da rede permite que a qualidade das correções geradas para cada estação de referência seja verificada com as correções remanescentes. Assim, se uma estação particular está gerando correções errôneas, o uso da rede permite uma possível detecção e eliminação desse erro para a solução final.

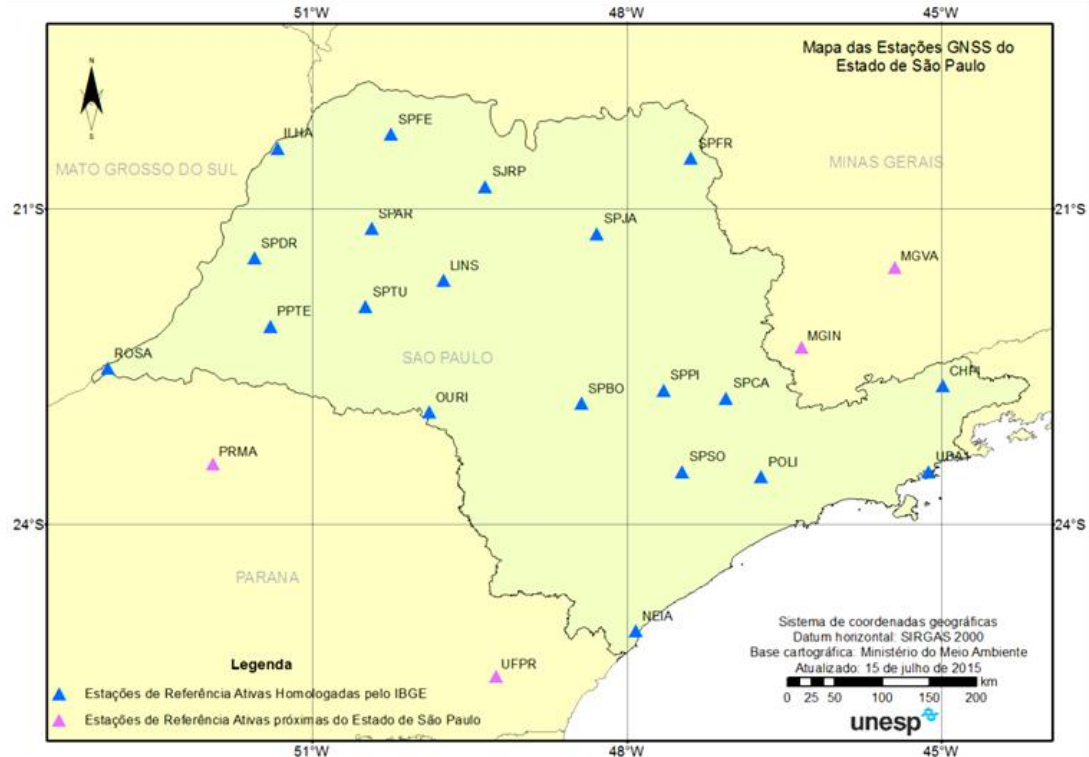
Outro fato importante que vem fortalecendo e viabilizando o posicionamento com múltiplas estações é a existência de redes de estações de referência ativas pelo mundo todo. Principalmente, em países mais desenvolvidos, como é o caso, por exemplo, da Alemanha, Estados Unidos e Japão, as redes de estações de referência são adequadamente densificadas. No que concerne ao Brasil, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (Figura 1), com a configuração atual, torna inviável a aplicação do posicionamento baseado em redes, pois a distância entre as estações ainda é muito grande (várias dezenas de quilômetros). No entanto, a rede GNSS/SP (Figura 2) é a rede pública mais densa do Brasil, e até mesmo da América do Sul, e, além disso, disponibiliza dados em tempo real.

Figura 1—Estações GNSS da RBMC



Fonte: Adaptada de ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/relatorio/RBMC_2014.png. (Acesso em 13/01/2016)

Figura 2—Estações GNSS da rede GNSS/SP



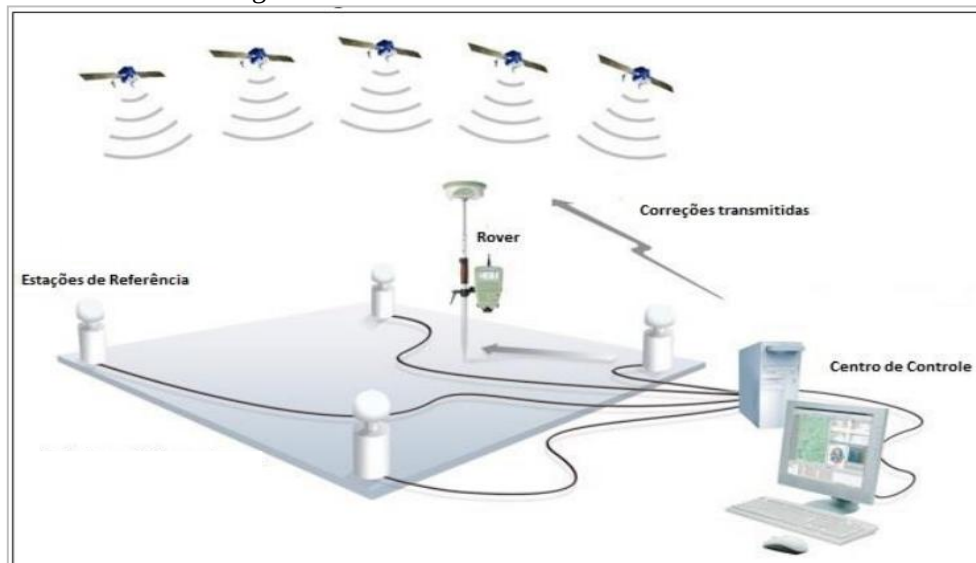
Fonte: <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/>
(Acesso em 12/01/2016)

Outro aspecto importante do posicionamento GNSS baseado em redes é que ele permite a modelagem dos erros espacialmente correlacionados, como o efeito ionosférico e a refração troposférica. Portanto, correções desses erros podem ser geradas e disseminadas ao usuário para melhorar a acurácia do posicionamento. Um resultado direto da modelagem dos erros espacialmente correlacionados é a maior facilidade na correta solução das ambiguidades da fase de batimento da onda portadora, indispensável para obter resultados de posicionamento em nível centimétrico (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

No entanto, de acordo com Fotopoulos (2000), existem algumas desvantagens associadas ao uso de uma rede de estações de referência. Mais especificamente, dependendo do método usado, pode existir um possível aumento da carga de transmissão dos dados (correções) e complexidade na implementação a ser realizada pelo usuário, se comparado ao uso de uma única linha de base. Combinar todas as observações da rede em uma estação central de processamento, e então transmitir para o usuário as correções da rede ou observações de uma estação de referência virtual (VRS) próxima ao usuário é um dos métodos para superar essas limitações.

Para utilizar o conceito de VRS, os dados das estações de referência são enviados para um computador do centro de controle via uma rede de comunicação (Figura 3). Esse computador, juntamente com softwares apropriados, utilizam os dados das estações de referência para modelar os erros sistemáticos (que limitam a acurácia do posicionamento GPS) e gerar correções apropriadas para serem utilizadas na área de abrangência da rede (ALVES, 2008, ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003; EULER, KEENAN e ZEBHAUSER, 2001).

Figura 3– Infraestrutura do Posicionamento em Redes

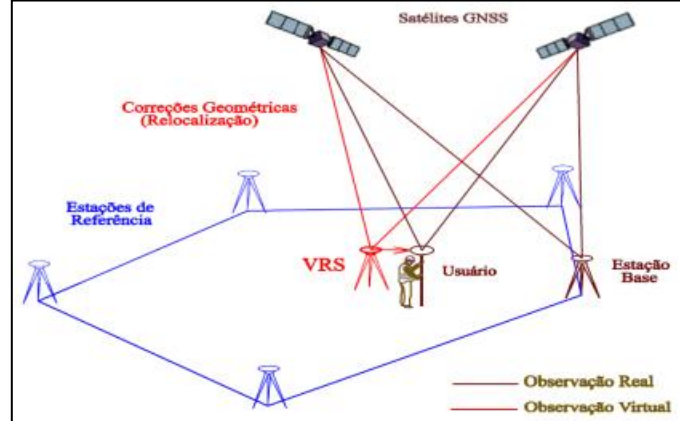


Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

Quando se deseja gerar uma VRS para um determinado usuário, a localização aproximada do usuário deve ser transmitida para o computador do centro de controle. Dessa forma, um link de comunicação bi-direcional entre o usuário e o controle central deve ser estabelecido.

O computador do centro de controle gera as observações dessa estação virtual e as envia para o usuário, que pode realizar o posicionamento relativo utilizando a VRS, como se fosse uma estação de referência nas suas proximidades (Figura 4). Dessa forma, a ideia básica do conceito de VRS é gerar uma estação que não existe fisicamente, mas que simule uma estação base próxima ao usuário. Assim, o usuário utiliza os dados dessa VRS como se ela fosse uma estação de referência real (ALVES, 2008; EULER, KEENAN e ZEBHAUSER, 2001).

Figura 4 – Conceito de Estação de Referência Virtual (VRS)



Fonte: Adaptado de Alves (2008).

Em suma, a ideia básica é que os dados da VRS se assemelhem tanto quanto possível com aqueles de um receptor real colocado no mesmo local. Isso implica que os erros atmosféricos (ionosfera e troposfera) devem ser estimados e acrescentados nos dados (MAREL, 1998).

Outra possibilidade é utilizar o conceito de VRS no modo pós-processado. Nesse caso os dados da VRS podem ser gerados diretamente no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), tal conceito é empregado no sistema VRS_Unesp. Além disso, existe um vasto número de aplicações que se beneficiariam com essa metodologia, dentre elas o georreferenciamento de imóveis rurais (ALVES, 2010).

Segundo Alves (2008), a necessidade do receptor móvel transmitir sua posição pode ser eliminada se o computador de controle central transmitir observações virtuais para uma grade de pontos dentro da rede. Neste caso, os dados da VRS mais próxima seriam adotados no processamento. Em uma situação como essa, a grade de VRSs também pode dar apoio para aplicações cinemáticas.

2.2.1 Geração dos dados da VRS

Para gerar os dados da VRS, seleciona-se a estação de referência da rede mais próxima ao usuário (estação base¹) e é calculado o deslocamento geométrico (DG), a partir das

¹ A nomenclatura utilizada “estação base” está relacionada com a estação da rede mais próxima ao usuário. Não se deve confundi-la com a estação base utilizada no posicionamento relativo, por exemplo, (ALVES, 2011).

distâncias geométricas entre a posição do satélite e a estação base e entre o satélite e a VRS, como apresentado na Figura 5, e nas equações a seguir (Equações 1 à 3).

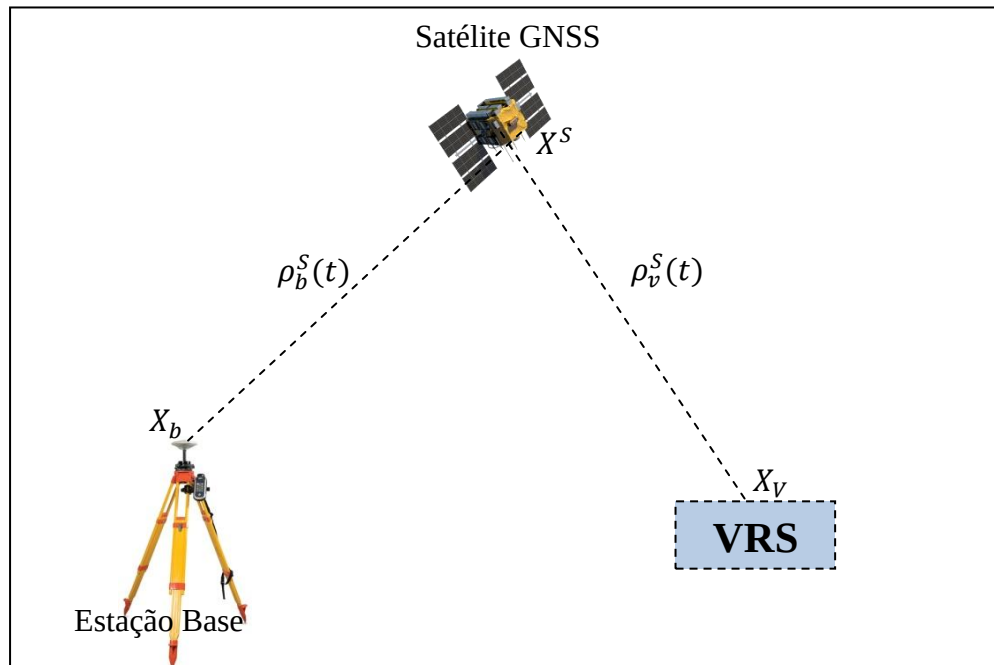
$$\rho_b^S(t) = \|X^S - X_b\| \quad (1)$$

$$\rho_v^S(t) = \|X^S - X_v\| \quad (2)$$

Onde:

- $\rho_b^S(t)$ e $\rho_v^S(t)$ são a distância geométrica (em m) entre o satélite e a estação de referência base e a VRS, respectivamente;
- t é o tempo de transmissão do sinal em segundos (s);
- X^S é a posição (X, Y, Z) do satélite no instante t ;
- X_b e X_v são a posição da estação de referência base e VRS, respectivamente em m.

Figura 5 - Elementos envolvidos na correção do DG



Fonte: Adaptado de Alves, 2008

Finalmente, o DG, ou seja, re-localização, é dada pela Equação 3. Vale ressaltar que o DG ($\Delta\rho$) deverá ser aplicado às observações de fase e pseudodistância da estação base para deslocá-las para a posição da VRS (HU et al., 2003).

$$\Delta\rho = \rho_v^S(t) - \rho_b^S(t) \quad (3)$$

Após a aplicação das correções geométricas (DG), são aplicadas aos dados originais da estação base, as correções atmosféricas (efeitos da ionosfera e atraso troposférico) geradas para a região a partir dos dados das estações de referência da rede. Tais correções podem ser obtidas a partir de diferentes modelos (MAREL, 1998; ALVES, 2008). As Equações 4 e 5, representam os dados de fase (ϕ_v^S) e pseudodistância (PD_v^S) gerados para o satélite S na posição da VRS.

$$\phi_v^S = \phi_b^S + \frac{1}{\lambda}(\Delta\rho^S + \Delta I + \Delta T) \quad (4)$$

$$PD_v^S = PD_b^S + (\Delta\rho^S + \Delta I + \Delta T) \quad (5)$$

Onde:

$$\Delta I = I_v^S - I_b^S \quad (6)$$

$$\Delta T = T_v^S - T_b^S \quad (7)$$

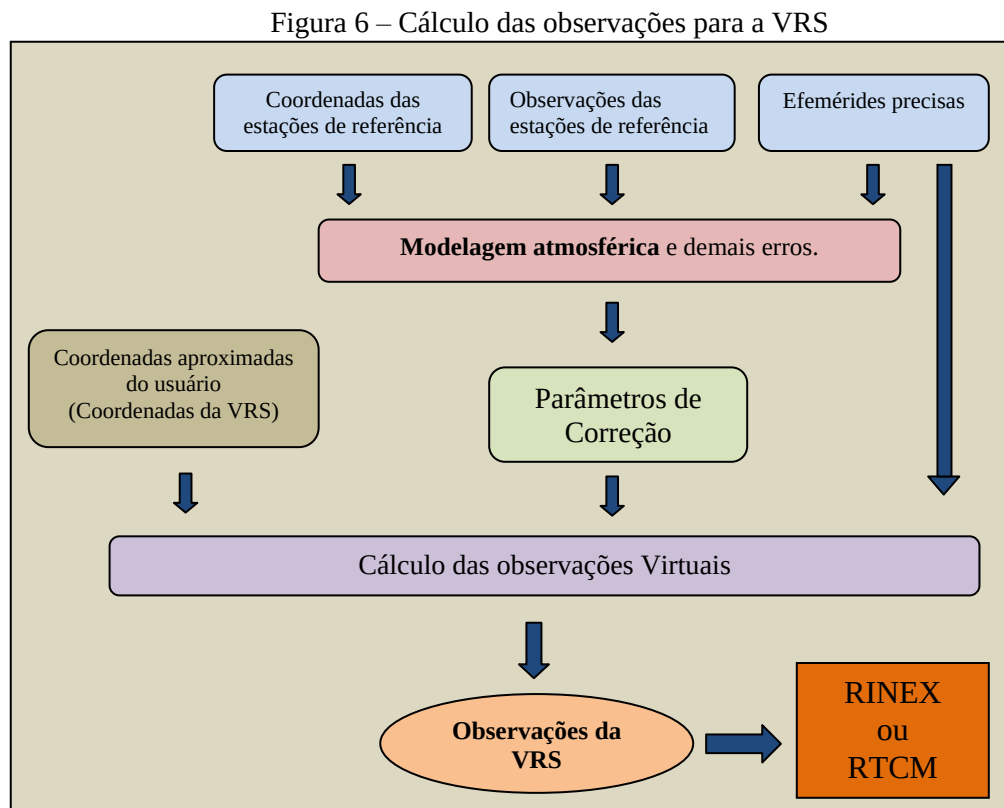
O erro do relógio do receptor e as ambigüidades que serão introduzidos aos dados da VRS podem ser escolhidos livremente. Pode-se escolher o relógio de um receptor ou a média de todos os receptores.

Devido ao uso das efemérides precisas, disponibilizadas pelo IGS, os erros orbitais são reduzidos automaticamente nos dados da VRS. Além disso, tais erros também são absorvidos nos resíduos do ajustamento.

Não há modelagem dos erros provocados pelo multicaminho, no entanto, podem ser adotadas técnicas para atenuar os efeitos do mesmo, como por exemplo, antenas especiais, o que tornaria menos significativo o erro no final do ajustamento (MAREL, 1998;

EULER, KEENAN e ZEBHAUSER, 2001). Na Rede GNSS/SP (Figura 2), cujos dados estão sendo utilizados nessa pesquisa, já estão empregadas antenas *choke rings*. Trata-se de uma antena com um plano de terra (disco metálico horizontal onde a antena é centrada) que contém uma série de círculos concêntricos com altura de aproximadamente um quarto do comprimento de onda, valor máximo do multicaminho para a portadora. Tal composição faz desse tipo de antena um dos melhores para proteção contra os sinais refletidos (multicaminho) (MONICO, 2008).

Os dados da VRS poderão ser distribuídos em formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) via *internet* para que os usuários possam realizar posicionamento no modo pós-processado. Mas também é possível a transmissão dos dados da estação virtual em tempo real por meio do formato *Radio Technical for Maritime Services* (RTCM) para aplicações RTK. No entanto, além da necessidade de processamento dos dados de todas as estações de referência em tempo real, deve haver uma boa infra-estrutura de comunicação. A Figura 6 apresenta um esquema que descreve o processo de geração das observações virtuais.



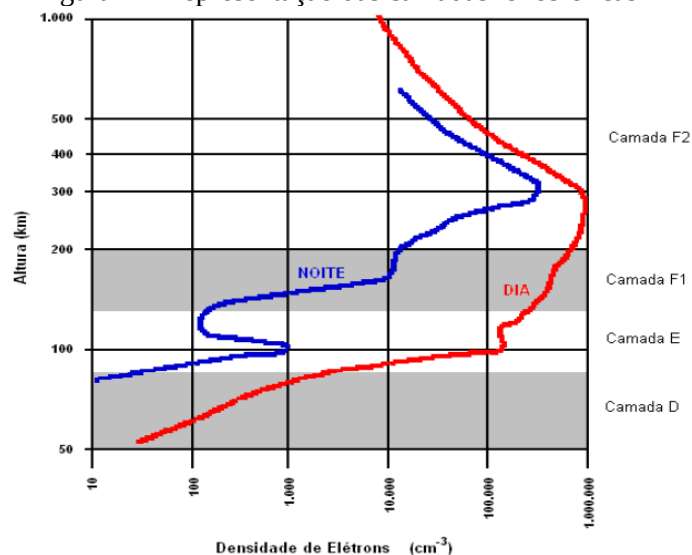
Fonte: Adaptado de Alves (2008)

2.3 Ionosfera e seus efeitos no posicionamento GNSS

A radiação solar causa a fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões com alta densidade de elétrons livres capazes de afetar a propagação de ondas de rádio, tais como as transmitidas pelos satélites GNSS, conhecidas como ionosfera, que está compreendida, aproximadamente, entre 50 a 1000 km acima da superfície Física da Terra (DAVIES,1990; LEICK, 1995; McNAMARA,1991). Na realidade, a fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois, a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera. A ionosfera se comporta como um meio dispersivo para a faixa de frequência GNSS, afetando a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço (LEICK, 1995; CAMARGO, 1999).

Durante o dia, diversas camadas ou regiões ionosféricas são reconhecidas, deste modo, admite-se que a ionosfera é formada de três regiões, D, E, e F, que são caracterizadas pelas variações da densidade de elétrons à medida que a altitude aumenta. Além disso, cada região contém, muitas vezes, outras sub-camadas, como por exemplo, a camada F, que para épocas de alta ionização divide-se em duas ou mais regiões designadas de F1 e F2 (WEBSTER, 1993; CAMARGO, 1999; AGUIAR, 2010). Na Figura 7, pode-se ver a representação da distribuição destas camadas citadas anteriormente, assim como a densidade de elétrons ao longo do dia.

Figura 7 – Representação das camadas ionosféricas



Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

A região mais baixa da ionosfera, camada D, com altitude máxima de aproximadamente 85 km, cuja concentração máxima de elétrons é na ordem de 10^3 elétrons/cm³ (el/cm³), desaparece durante a noite, devido à falta de ionização e recombinação dos elétrons (DAVIES, 1990; FEDRIZZI, 1999).

No que concerne à camada E, é a região compreendida entre as altitudes de 85 e 140 km, apresentando uma concentração de elétrons, da ordem de 10^5 el/cm³. A densidade de elétrons é maior, quando próxima do meio dia local, com comportamento quase simétrico, ao longo do dia. Variações na densidade de elétrons ocorrem próximo das altitudes de 90 – 120 km ou maiores, gerando uma fina camada designada de esporádica E (Es). Nas regiões próximas ao equador magnético, ocorrências diurnas da esporádica E são bem comportadas e apresentam feições regulares com pouca variação sazonal. A camada Es ocorre ocasionalmente à noite, para altas latitudes, e ,durante o dia, próxima ao equador magnético. Nas médias latitudes, a ocorrência é maior durante o verão do que no inverno (FEDRIZZI, 1999).

A região compreendida, aproximadamente, entre as altitudes de 140 km e 200 km é designada de F1 e apresenta uma concentração de elétrons variando de $2,5 \times 10^5$ el/cm³ a 4×10^5 el/cm³, para períodos de manchas solares mínimas e máximas, respectivamente. Porém, à noite, essa região desaparece. A região F2 é definida como a região compreendida de 200 km até, aproximadamente, 1000 km. A altitude de pico de concentração da densidade máxima de elétrons nesta região varia, consideravelmente, durante o ciclo de mancha solar, com a latitude (CAMARGO, 1999; McNAMARA, 1991).

Em suma, a formação da ionosfera está intimamente associada principalmente à radiação solar eletromagnética incidente na atmosfera terrestre, bem como atividade geomagnética, com menor grau de importância, à radiação cósmica. Consequentemente, o comportamento da ionosfera depende do ângulo zenital solar, da localização geográfica, da estação do ano e do nível de atividade solar (FEDRIZZI, 1999).

Os efeitos dos erros ionosféricos são muito significativos no posicionamento GNSS (1–2 ppm ou mais) até mesmo sob condições ionosféricas moderadas em latitudes médias, com mínima presença de manchas solares (CAMARGO, 1999). Este efeito ionosférico é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC – *Total Electron Content*), que é o número de elétrons presentes ao longo

do caminho percorrido pelo sinal. Assim, o TEC é o principal parâmetro descritor do efeito ionosférico nos sinais GNSS, porém varia, no tempo e no espaço (DAVIES, 1990;).

O TEC representa o número de elétrons contidos numa coluna que se estende desde o receptor até o satélite, e cuja área da base é unitária (1 m²). É apresentado em unidades de TEC (TECU), que equivale a 1×10^{16} el/m², e pode ser calculado por uma combinação linear entre as observáveis de pseudodistância ou fase da onda portadora em L_1 e L_2 , denominada combinação linear livre da ionosfera ($L_0 - Ion-Free$). (DAVIES, 1990; LEICK, 1995; MATSUOKA, 2007; AGUIAR, 2010).

A conversão dos valores do TEC em erro devido à ionosfera para pseudodistância, e para a fase da onda portadora é dada conforme apresentado em Leick (1995), Seeber (2003) e Monico (2008). Vale ressaltar, que a demonstração para obter a expressão apresentada a seguir, pode ser encontrada nas referências citadas.

$$I_{irg}^s = \frac{40,3 \cdot TEC_r^s}{f_i^2}, \quad (8)$$

$$I_{ir\phi}^s = -\frac{40,3 \cdot TEC_r^s}{f_i^2}, \quad (9)$$

onde:

- I_{irg}^s é o efeito ionosférico para a pseudodistância na portadora L_i ;
- $I_{ir\phi}^s$ é o efeito provocado pela ionosfera nas medidas de fase em L_i ,
- f_i é a frequência da onda (MHz) portadora utilizada ($i = 1, 2$).
- TEC_r^s é o conteúdo total de elétrons existentes entre o satélite s e o receptor r e a unidade para representá-lo é dada em elétrons por metros quadrados (el/m²).

De acordo com as equações 8 e 9, pode-se verificar que os erros devido à ionosfera para fase e pseudodistância são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários, pois sofrem respectivamente, avanço e retardo. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais às respectivas frequências ao quadrado. Logo, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera. No Quadro 1, tem-se o efeito que a refração ionosférica causa na

propagação, ou seja, o atraso zenital ionosférico para diferentes frequências e indica o erro residual na vertical para combinações entre duas frequências (SEEBER, 2003).

Quadro1 – Efeito da ionosfera em distâncias observadas na vertical com uma frequência e erros residuais para combinações entre duas frequências

Simples frequência	400 MHz	1600 MHz	2000 MHz	8000 MHz
Efeito Médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% menor que	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m
Dupla frequência	150/400 MHz	400/2000 MHz	1227/1572 MHz	2000/8000 MHz
Efeito Médio	0,6 m	0,9 cm	0,3 cm	0,04 cm
90% menor que	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22 cm	4,5 cm	0,43 cm

Fonte Seeber (2003).

Vale ressaltar que, em (8) e (9), o TEC é dado ao longo da direção do satélite e do receptor (STEC – *Slant TEC*) (BRUNIN e AZPILICUETA, 2010). Para o TEC na direção vertical (VTEC), é necessário utilizar uma função de mapeamento, sendo que a função secante é comumente empregada (Equações 10 e 11). Deste modo, o efeito da refração ionosférica é calculado com as seguintes formulações, para pseudodistância (I_{ig}^s) e fase ($I_{i\phi}^s$), respectivamente (MONICO, 2008; LEICK, 1995; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007):

$$I_{ig}^s = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f_i^2} VTEC \quad (10)$$

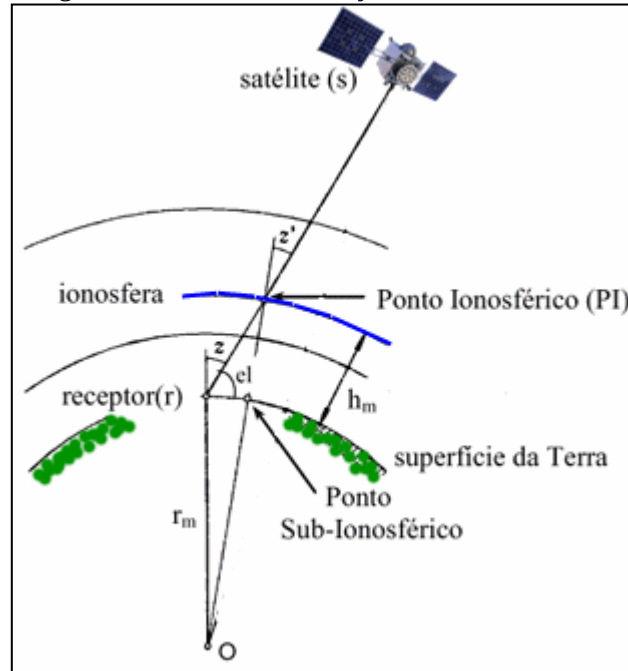
$$I_{i\phi}^s = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f_i^2} VTEC \quad (11)$$

O valor de z' , que representa o ângulo zenital do caminho do sinal em relação a um plano de altitude média H_m , denominado ponto ionosférico, é obtido por:

$$\text{sen} z' = \frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen} z \quad (12)$$

Sendo R_m o raio médio da terra e z o ângulo zenital do satélite observado. A Figura 8, ilustra tais parâmetros envolvidos nas expressões 10,11 e 12.

Figura 8 – Geometria da trajetória do sinal GNSS



Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2008)

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático devido a ionosfera, representa somente o efeito de primeira ordem da ionosfera, o qual pode ser modelado com dados obtidos com receptores GNSS de dupla frequência. O erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 2003). O Quadro 2 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado para as portadoras L_1 , L_2 e para L_0 – *Ion-Free*. Para direções inclinadas, a influência aumenta em até 3 vezes no horizonte, aproximadamente (HOFMANN-WELLENHOF et al, 2008).

Quadro 2– Máximo efeito sistemático vertical devido á ionosfera

Frequência	1ª ordem ($1/f^2$)	2ª ordem ($1/f^3$)	3ª ordem ($1/f^4$)
L_1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L_2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L_0	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Seeber (2003).

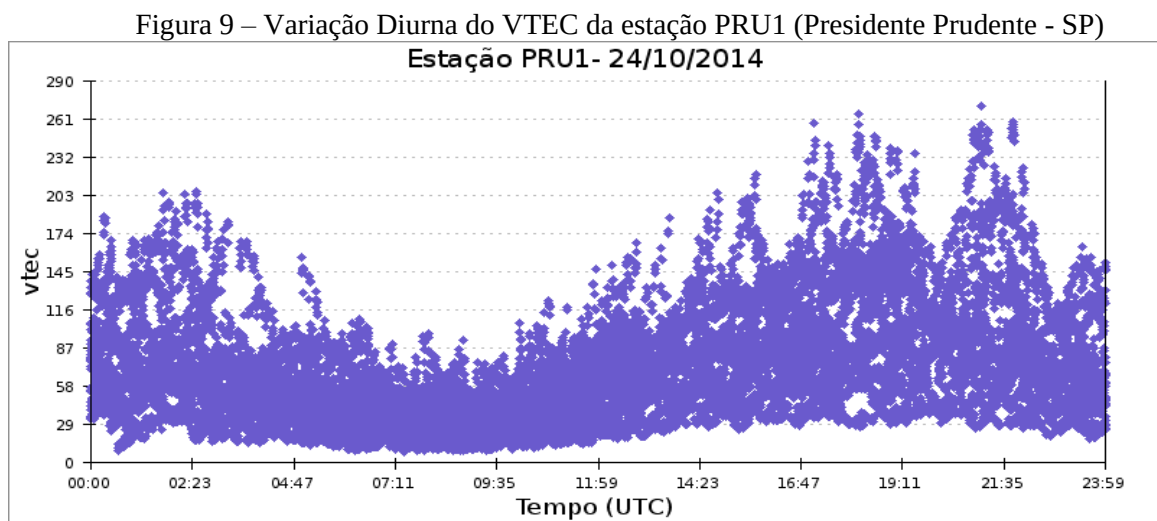
2.3.1 Variações do Conteúdo Total de Elétrons (TEC)

Na prática, com base na combinação linear livre da geometria entre observáveis de diferentes portadoras se obtém o TEC, que é o principal parâmetro para descrever a atividade ionosférica no posicionamento GNSS. Contudo, um dos problemas no estudo da ionosfera é a variabilidade temporal e espacial do TEC em função de diversas influências que serão apresentadas nos próximos itens.

2.3.1.1 Variações Temporais

As variações temporais, tais como, variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos, influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera.

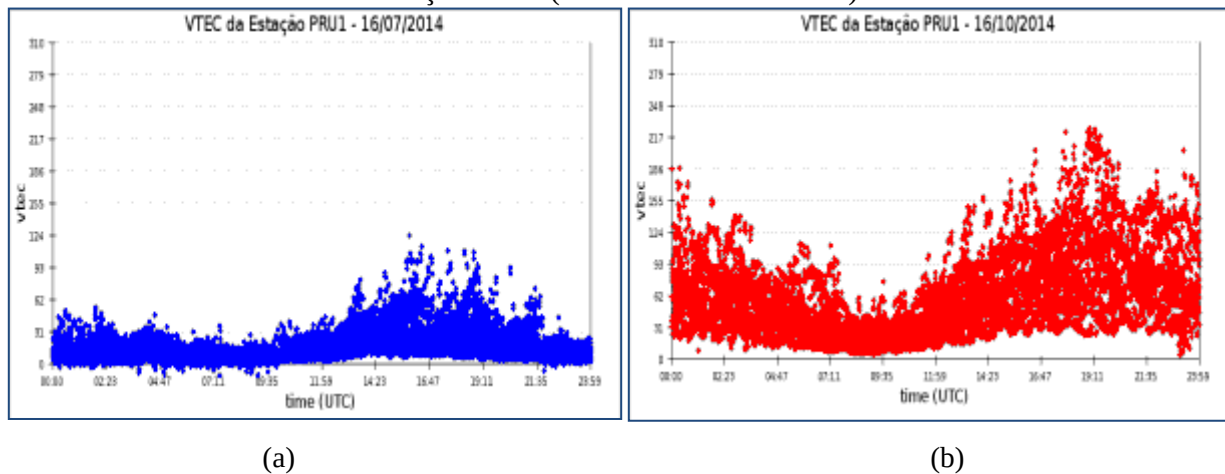
As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em algumas regiões da ionosfera, que por sua vez desaparecem à noite, devido à recombinação e junção dos elétrons e íons. A principal razão da existência da variação diurna é devido à radiação solar. Ao longo do dia a densidade de elétrons depende da Hora Local (HL), sendo que seu valor máximo ocorre entre as 12 e 16 HL (15 – 19 UTC), com pico próximo as 14 HL, como pode ser observado na Figura 9. No entanto, em regiões de baixas latitudes, ocorre um segundo máximo, logo após o pôr do Sol, entre 18-19 HL (21–22 UTC), sendo geralmente maior que o primeiro (McNAMARA, 1991; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007).



Fonte: Ferramenta ISMR Query Tool do Projeto CALIBRA <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/view/View.php>> (Acesso em 20/10/14)

A densidade de elétrons na ionosfera varia durante os meses do ano devido a variação sazonal do ângulo zenital do Sol, bem como, a intensidade do fluxo de ionização. No hemisfério sul, valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de equinócio, sendo eles, março, abril, setembro e outubro. Os valores mínimos ocorrem nos meses de solstícios de inverno e verão, porém com maior destaque os meses referentes ao inverno, como junho e julho (McNAMARA, 1991; MONICO, 2008; MATSUOKA, 2007). Isto pode ser verificado na Figura 10, bem com nos experimentos realizados por Camargo e Dal Poz (2002).

Figura 10– Variação Sazonal do TEC (a) o VTEC referente à Julho e (b) VTEC de Outubro para estação PRU1 (Presidente Prudente –SP)

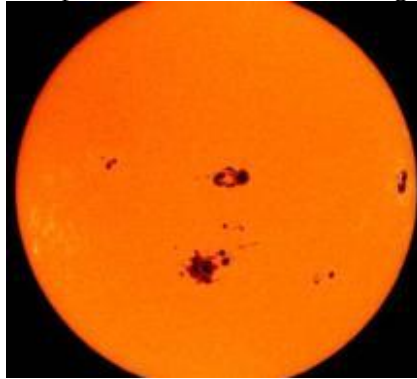


Fonte: Ferramenta ISMR Query Tool do Projeto CIGALA/CALIBRA <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/view/View.php>> (Acesso em 30/10/14)

A respeito dos valores mínimos, é importante citar que no hemisfério norte a densidade de elétrons é menor no verão do que no inverno, caracterizando o que se chama de anomalia sazonal de latitudes médias (McNAMARA, 1991; OLIVEIRA, 2003).

No que concerne às variações de ciclos de longos períodos com duração de aproximadamente 11 anos, são associadas as ocorrências de manchas solares, e o aumento de ionização é proporcional ao número de manchas. Segundo Mcnamara (1991), as manchas solares, representadas pela Figura 11, são regiões mais frias e escuras, que aparecem na superfície do Sol. Elas são rodeadas por regiões mais brilhantes que emitem um nível mais alto de radiação ultravioleta. Com isso, o aumento do número de manchas solares intensifica a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (LANGLEY, 2011).

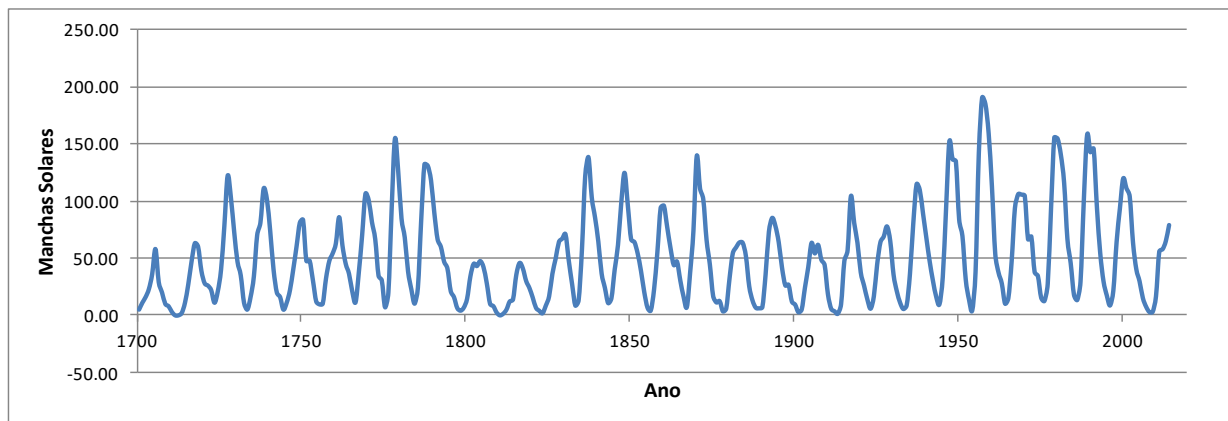
Figura 11 – Imagem da superfície do Sol mostrando algumas manchas solares



Fonte: <http://www.crh.noaa.gov/fsd/?n=sunspots>. (Acesso em 30/11/14)

Deste modo, o valor do TEC é proporcional ao aumento da atividade solar, ou seja, ao aumento do número de manchas solares. Em períodos de máxima atividade (maior número de manchas), o TEC máximo diurno pode atingir valores até 50% maiores do que em períodos de mínima atividade (menor número de manchas) (FEDRIZZI, 2003; MATSUOKA, 2007). A Figura12 apresenta registros de ciclos solares, desde 1700 até aproximadamente 2015. Estes ciclos são definidos com relação ao número de manchas solares. Atualmente, a ionosfera está no “ciclo solar 24”, como pode ser visto na Figura 13, a predição do ciclo atual e o anterior em 2007 e 2015.

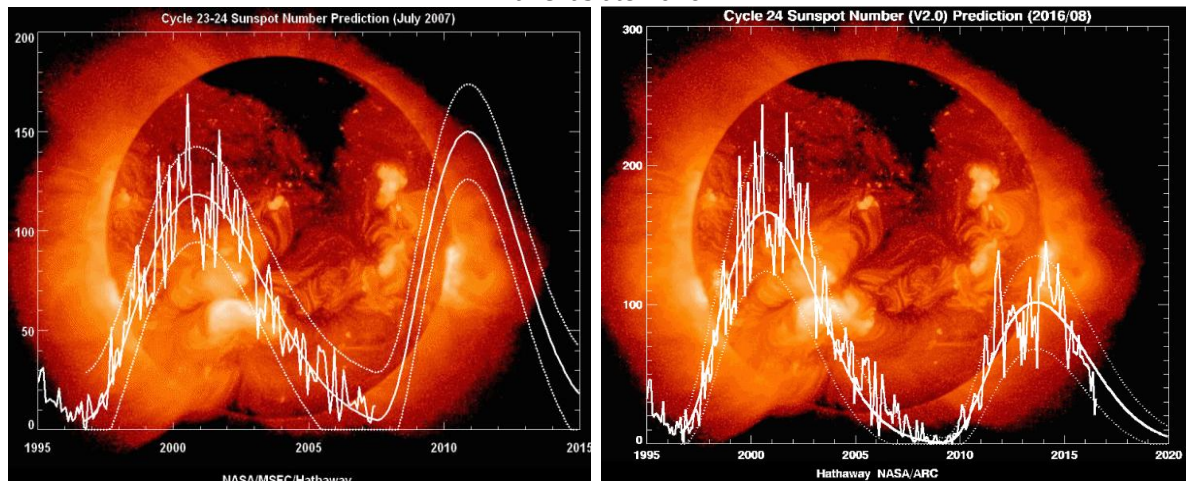
Figura12 – Ciclos Solares de 11 anos desde 1700 até 2015



Fonte: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>. (Acesso em 02/02/2015)

É importante ressaltar que muitos pesquisadores e até a própria NASA esperavam que o atual ciclo fosse um dos maiores desde 1749, com aproximadamente 200 manchas (Figura 13), no entanto, este tornou-se o menor ciclo desde 1906 (ciclo 14).

Figura 13 – Predição do número de manchas para o ciclo atual -24 (a) em 2007 e (b) a quantidade de manchas até 2016



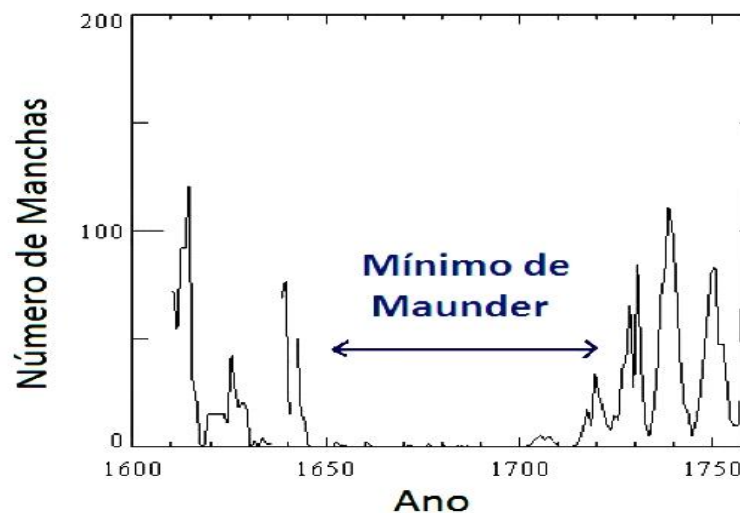
(a)

(b)

Fonte: <http://wattsupwiththat.com/2010/10/06/nasas-hathaway-issues-new-solar-cycle-prediction/> e http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif. (Acesso em 12/08/2016)

Uma possível causa para tal anomalia nas predições é uma componente de baixa frequência no ciclo solar, conhecida como ciclo de *Wolf–Gleißberg* (McNAMARA, 1991). Na década de 1890, o astrônomo Walter Maunder observou uma irregularidade nos períodos de 11 anos, conhecida, posteriormente, como o Mínimo de Maunder (MENDONÇA, 2013). Essa irregularidade aconteceu entre 1645 e 1715, onde pouquíssimas manchas solares foram observadas. A Figura 14 mostra a atípica contagem para o período.

Figura 14 – Representação do número de Manchas Solares entre 1610 e 1760.



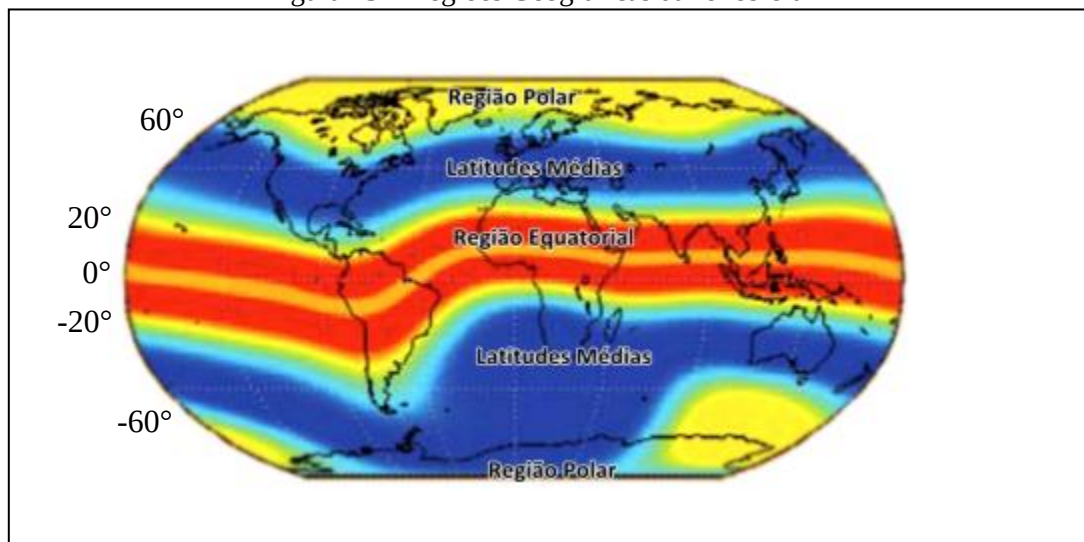
Fonte: Adaptado de Mendonça (2013)

Caso o ciclo de *Wolf–Gleißberg* seja um fato, os períodos do mínimo de Maunder, o período observado entre 1790 e 1830, bem como o período iniciado após o pico de atividade solar de 2003, estariam correlacionados e fazem parte desse ciclo que dura entre 80 e 100 anos (MENDONÇA, 2013; McNAMARA, 1991).

2.3.1.3 Variação Espacial

A estrutura global da ionosfera não é homogênea. Ela muda com a latitude geomagnética, devido à variação do ângulo zenital do Sol, que influencia, diretamente, no nível de radiação solar. A Figura 15 apresenta a localização das três maiores regiões geográficas da ionosfera: equatorial, polar e latitude médias. As regiões equatoriais delimitadas aproximadamente pelas latitudes 20° S e 20° N são caracterizadas por um alto nível de densidade de elétrons. Já, as regiões de latitudes médias, delimitadas entre a latitude de $\pm 20^{\circ}$ a $\pm 60^{\circ}$, são consideradas relativamente livres das anomalias ionosféricas, enquanto as regiões polares, delimitadas entre a latitude de $\pm 60^{\circ}$ a $\pm 90^{\circ}$, não são muito previsíveis (WEBSTER, 1993; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007). A influência da longitude, devido à não coincidência dos polos geográficos e magnéticos, é sensível somente nas regiões mais altas.

Figura 15 – Regiões Geográficas da Ionosfera



Fonte: Adaptado de <http://www.gpsworld.com/wp-content/uploads/2012/03/Fig1.jpg>. (Acesso em 04/04/2014)

2.3.1.2 Eventos Solares

O Sol é um ambiente extremamente volátil e inconstante. Devido ao fato de que sua superfície sofre alterações de temperatura, densidade e locação de matéria com bastante frequência e intensidade, além disso, o campo magnético do Sol também se torna sensível a tais inconstâncias, fazendo com que sua última camada atmosférica, a corona solar, sofra mudanças abruptas (MOLDWIN, 2008).

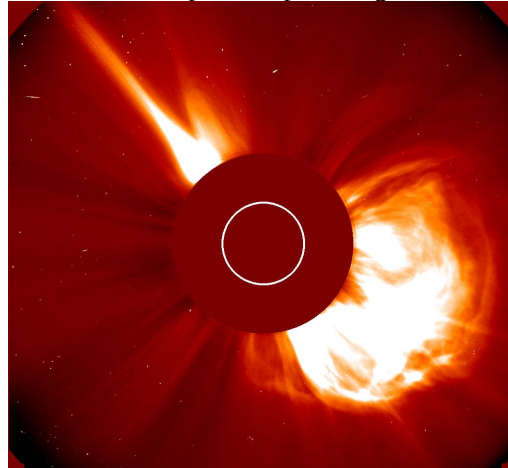
Nessa ultima camada, a temperatura elevada fornece energia a átomos de Hidrogênio e Hélio, que podem, então, escapar da força gravitacional e formar nuvens de partículas altamente energizadas e velozes. Esse fluxo de partículas em situações calmas tem velocidade de cerca de 400 km/s, podendo chegar a 1000 km/s ou mais, em situações extremas, e são chamadas de vento solar (MENDONÇA, 2013; MOLDWIN, 2008). Segundo Mendonça (2013), ocasionalmente, reconfigurações repentinas no campo magnético solar fazem com que uma grande quantidade de matéria presente na corona seja lançada para longe.

Por consequência da constante iluminação direta do Sol e das altas temperaturas, o vento solar é composto totalmente por plasma ionizado, diferentemente da ionosfera terrestre, que contém também elementos neutros. Isso faz com que, constantemente, a Terra seja “bombardeada” por plasma quente, magnetizado, supersônico, com considerável quantidade de energia cinética e elétrica e capaz de conduzir corrente. O efeito causado por esse bombardeio é a alteração das características do campo magnético normal (McNAMARA, 1991, LANGLEY, 2011), como será apresentado na seção 2.3.1.4.

As Ejeções Coronais de Massa ou ECM (*Coronal Mass Ejections*) podem ser definidas como grandes estruturas magnéticas contendo trilhões de quilos de materiais outrora presentes na Corona solar (KUNOW et al, 2007). Pela Figura 16 observa-se que a nuvem de partículas lançadas tem uma área maior que a do próprio Sol. Desde o princípio do evento até o momento em que o material é lançado ao espaço, podem se passar diversas horas, momento no qual grande quantidade de matéria é lançada, movendo-se ainda mais rápido que a velocidade necessária para escapar da força gravitacional do sol, chegando a 3000 km/s ou mais dependendo da intensidade. Ao atingirem qualquer tipo de veículo espacial desprotegido, podem causar danos em seus componentes ou até inutilizá-los. Apesar de ainda não haver um consenso científico geral, a causa mais aceita para a ocorrência desse fenômeno é o evento de Reconexão Magnética

na atmosfera solar (ALEXANDER, RICHARDSON e ZURBUCHEN, 2006, MENDONÇA, 2013). Além disso, as ECM são conhecidas por ser a principal causa de distúrbios geomagnéticos na Terra, como as Auroras Boreais (MOLDWIN, 2008, MENDONÇA, 2013).

Figura 16 – ECM capturada por imagem do LASCO/SoHO



Fonte: NASA <http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003_11_04/>. (Acesso em 22/02/2015)

Outro evento de interesse para o posicionamento por satélites que acontece na atmosfera solar são os chamados *Solar Flares* ou Explosões Solares (Figura 17). As explosões Solares são eventos parecidos com as ECM, tendo como principal diferença suas dimensões. Um evento dessa categoria acontece em uma escala cerca de 10 a 100 vezes menor que as ECM e envolvem uma quantidade menor de material, porém, proporcionalmente são mais intensas (MENDONÇA, 2013, MOLDWIN, 2008). Esses eventos podem ocorrer liberando curtos “pulsos” de energia que em poucos minutos se dissipam, ou ,então, criando clarões luminosos que se estendem por horas e às vezes dias. A descarga energética faz com que uma determinada quantidade de energia seja lançada do Sol, muitas vezes, atingindo a Terra, dependendo de sua direção e intensidade. Ainda segundo Kunow et al. (2007), as explosões que têm maior duração, normalmente, são acompanhados por ECM na mesma área. A Figura 17 mostra um exemplo de uma explosão solar emitida da superfície solar.

Figura 17 – Explosão solar



Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>. (Acesso em 01/03/2014)

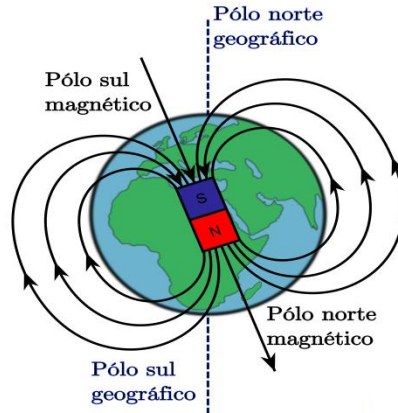
Pelos eventos descritos nessa subseção, torna-se claro que a influência solar na Terra se dá de diversas formas e com diversas magnitudes.

2.3.1.4 Campo Magnético

Outro fator importante que deve ser considerado quando se estuda ionosfera é o campo magnético da Terra, já que o mesmo exerce grande influência na variação da densidade de elétrons, pois controla o movimento das partículas ionizadas, logo, qualquer perturbação no campo geomagnético resultará em modificações nas condições de transporte do meio ionizado (KIRCHHOFF, 1991; MONICO, 2008; AGUIAR, 2010).

Próximo à superfície da Terra, o campo geomagnético pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação, como é ilustrado na Figura 18. . Acredita-se que o campo geomagnético origina-se no centro da Terra e as linhas de força magnéticas estendem-se a grandes distâncias da Terra (YAMASHITA, 1999, FEDRIZZI, 2003, MATSUOKA, 2007).

Figura 18 – Campo magnético da Terra (dipolo)

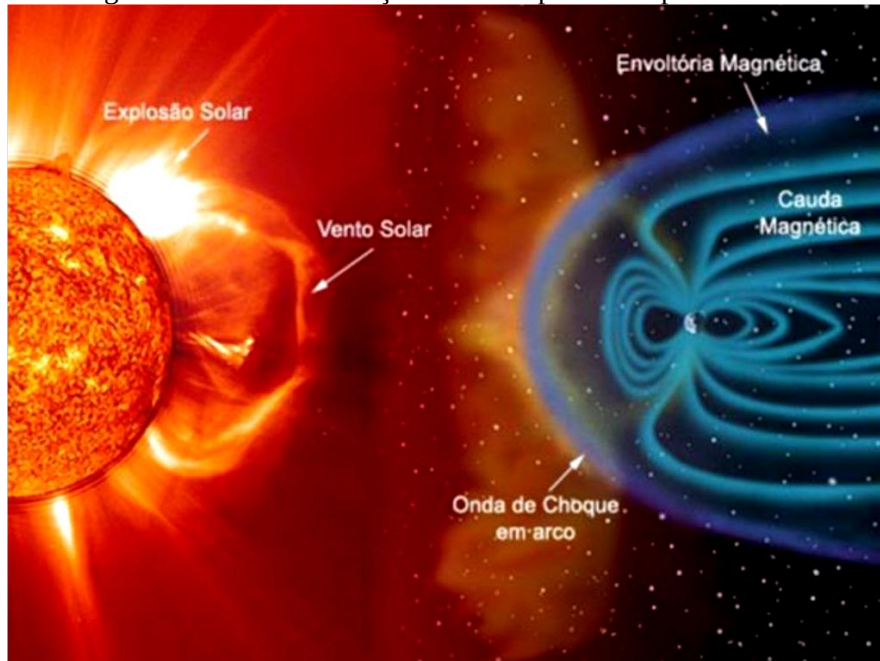


Fonte: Adaptada de MCNAMARA, 1991

As variações mais comuns observadas no campo magnético são aquelas produzidas através das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Além destas, podem ocorrer variações bruscas e muito intensas, provocadas pelos eventos solares descritos na seção 2.3.1.3 (OLIVEIRA, 2003; MENDONÇA, 2013; MATSUOKA, 2007).

Após eventos solares, as linhas de força do campo geomagnético podem ser comprimidas de forma significativa, afetando o comportamento da ionosfera. As emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar ocorrem continuamente, confinando e distorcendo o campo geomagnético (Figura 19) em uma cavidade com uma cauda magnética longa que se estende por centenas de raios terrestres na direção anti-solar, tornando-se diferente do modelo teórico da Figura 18. Esta cavidade denomina-se magnetosfera (LANGLEY, 2011). Dependendo da intensidade da perturbação, o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) é comprimido, podendo passar de 10 para 6 raios terrestres (MCNAMARA, 1991) enquanto, na outra ponta, onde é noite, a magnetosfera tem um formato de cauda (cauda magnética), que pode chegar a cerca de 1000 vezes o raio da Terra.

Figura 19 – Linhas de força sendo comprimidas após eventos solares



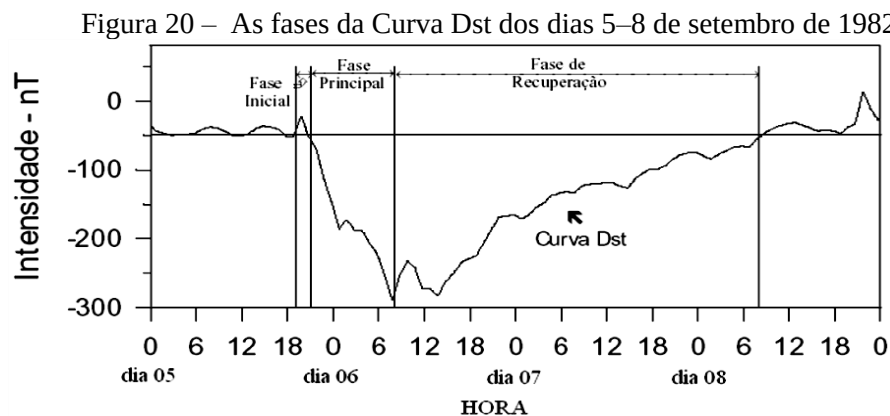
Fonte: <http://www.gpsworld.com/wp-content/uploads/2011/02/Fig2-W.jpg> . (Acesso em 08/03/2015)

Os eventos solares alteram os parâmetros do vento solar, como velocidade e densidade, e conseqüentemente, provoca uma alteração no campo geomagnético, que por sua vez contribuem para a ocorrência das tempestades geomagnéticas. Estas ocorrem em conjunto com as tempestades ionosféricas e têm as mesmas causas, como por exemplo, as explosões solares (MCNAMARA, 1991). As tempestades geomagnéticas mais intensas são frequentemente relacionadas com as ECM (FEDRIZZI, 2003). Os distúrbios geomagnéticos provocados por eventos solares são monitorados pelas estações em Terra, instaladas em observatórios magnéticos.

Frequentemente, são utilizados índices geomagnéticos para determinar a intensidade e a duração das tempestades geomagnéticas, como o índice *Disturbance Storm– Time* (Dst), *Planetarische Kennziffer*, ou índice planetário (Kp) (FEDRIZZI, 2003). Estes índices constituem em uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética, ou alguns de seus componentes.

O índice Dst (dado em nanoTesla – nT) representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999; DAL POZ e CAMARGO, 2006).

É principalmente desse parâmetro que se define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst apresenta um comportamento padrão. Primeiramente, antes mesmo do início da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por fase inicial. Posteriormente, desenvolve-se a fase principal da tempestade, que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice, denominada fase negativa da tempestade, e pode ter uma duração de meia até várias horas. Após alcançar o mínimo, é iniciada a fase de recuperação, onde o índice começa a subir de valor até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (YAMASHITA, 1999, DAL POZ e CAMARGO, 2006). A Figura 20 mostra a curva do índice Dst, bem como a descrição das fases mencionadas anteriormente, obtida entre os dias 5 – 8 de setembro de 1982, quando ocorreu uma intensa tempestade geomagnética.



Fonte: Adaptada de Dal Poz e Camargo(2006)

A classificação de uma tempestade geomagnética, de acordo com o índice Dst, é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3– Classificação de uma tempestade geomagnética– Índice Dst

Condição da Tempestade	Geomagnética Valor do índice Dst (nT)
Fraca	– 30 nT a – 50 Nt
Moderada	50 nT a – 100 nT
Intensa	– 100 nT a – 250 nT
Muito Intensa	<– 250 nT

Fonte: Fedrizzi (2003)

No que concerne ao índice Kp, faz-se necessário definir primeiramente o índice K, pois a partir desse índice que é derivado o índice Kp. Assim, o índice K é um índice local quase logarítmico que contém as variações ocorridas na atividade geomagnética, em intervalos de

três horas, relativas à um determinado observatório magnético (FEDRIZZI, 2003). O índice Kp é a média aritmética dos valores de K de 13 observatórios obtidos no espaço de tempo de três horas, começando a zero hora. Deste modo, cada dia tem oito valores de Kp, que podem variar de acordo com o Quadro 4 (WRENN et al., 1987 apud FEDRIZZI, 2003).

Quadro 4– Valores dos índices Kp e condições da atividade geomagnética

Atividade Geomagnética	Valor do índice Kp
Muito Calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2 ⁻
Normal	2 ⁻ a 3 ⁺
Perturbado	3 ⁺ a 4 ⁺
Muito Perturbado	4 ⁺ a 9

Fonte: Wrenn et al., 1987 apud Fedrizzi, 2003.

2.3.1.5 Irregularidades da Ionosfera

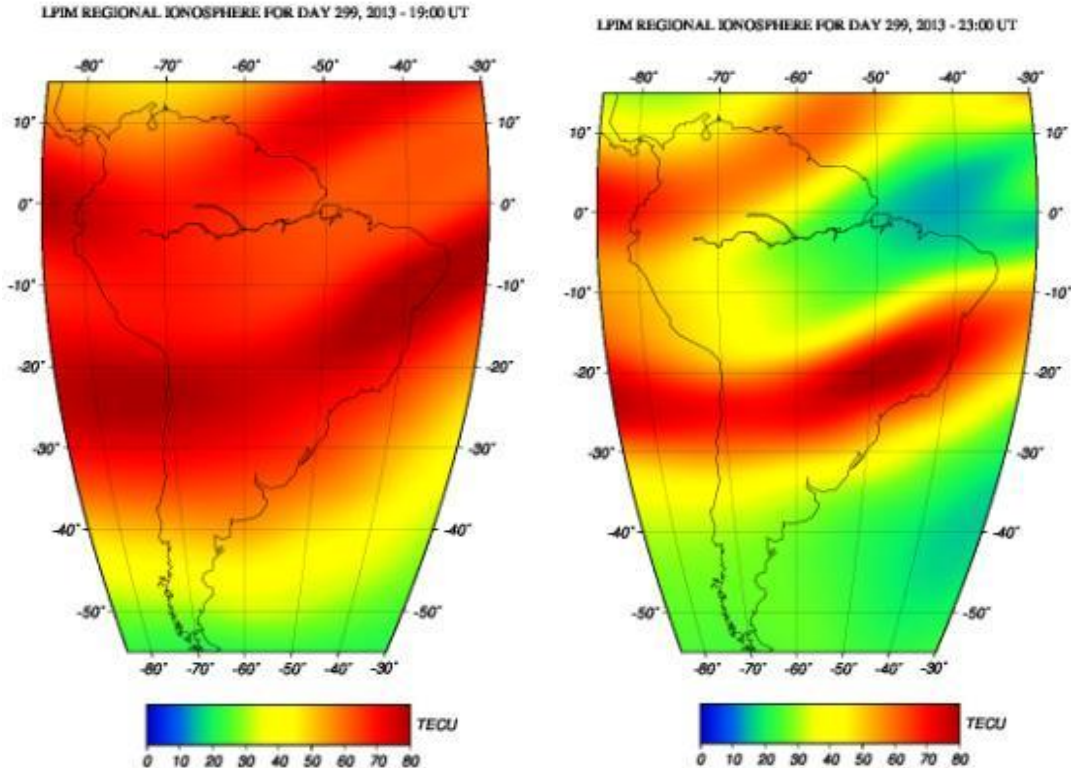
Devido à alta radiação solar na região equatorial e aos campos magnético e elétrico da Terra, a densidade de elétrons na ionosfera nesta região sofre irregularidades (Mc NAMARA, 1991; OLIVEIRA, 2003). Após a subida do plasma até elevadas altitudes na região equatorial, o plasma inicia um movimento de descida ao longo das linhas de campo geomagnético, devido à ação da gravidade e gradiente de pressão. Este movimento de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas de campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como *Efeito Fonte* (MATSUOKA, 2007; AGUIAR, 2010; OLIVEIRA, 2003).

Uma consequência da combinação dos movimentos de subida e subsequente descida do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais entre $\pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$ de latitude geomagnética. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de anomalia equatorial. Como resultado para o posicionamento GNSS é que altos valores de TEC estão presentes nas regiões de baixas latitudes, e altos gradientes de TEC podem ocorrer na direção norte-sul, afetando a qualidade tanto do posicionamento por ponto quanto do relativo (OLIVEIRA et al, 2012; VANI, 2013; AQUINO et al, 2006)

Nas faixas da anomalia equatorial que se localizam no território brasileiro as densidades de elétrons atingem valores maiores que em outras regiões da Terra. A Figura 21, com

o objetivo de mostrar a anomalia equatorial, apresenta uma sequência de mapas do TEC, produzidos pelo LPIM, para o dia 26 de outubro de 2013.

Figura 21 – Anomalia Equatorial

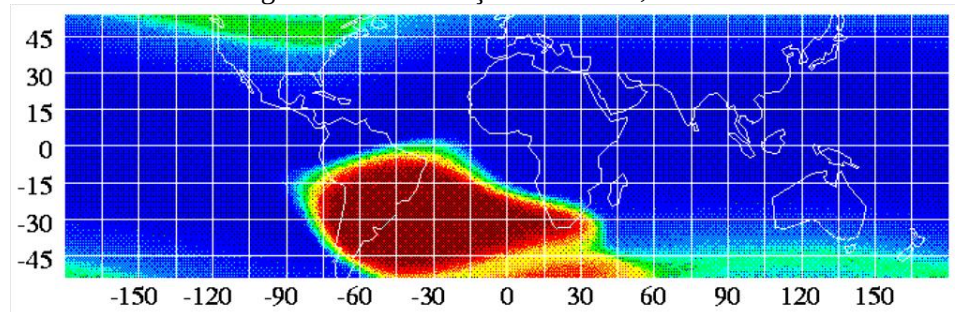


Fonte: <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/products/iono/graphics/2013/299/>. (Acesso em 03/11/15)

Cabe acrescentar, que mais especificamente na região da América Latina, existe uma peculiaridade que altera o comportamento da ionosfera, causada pela chamada AMAS – Anomalia Magnética do Atlântico Sul. A AMAS é uma pequena porção do planeta que apresenta a menor intensidade magnética de todo o globo terrestre. Nessa camada, os íons passam a ser afetados a cerca de 100 km de altitude, enquanto que em regiões no hemisfério norte, essa altitude chega a 600 km (MENDOÇA, 2013). Essa anomalia encontra-se sob a América do Sul, mas se move lentamente para o oeste. Sua localização é mostrada na Figura 22, onde, em vermelho, encontra-se a parte mais fraca do campo magnético.

Em virtude do campo magnético nesta região ter uma intensidade menor que em seu entorno, as partículas energizadas que normalmente se encontrariam na camada F, descem para a camada D da ionosfera, causando o efeito de ionização em uma quantidade ainda maior de partículas neutras, aumentando os valores de concentração de elétrons livres da região (LANGLEY, 2014).

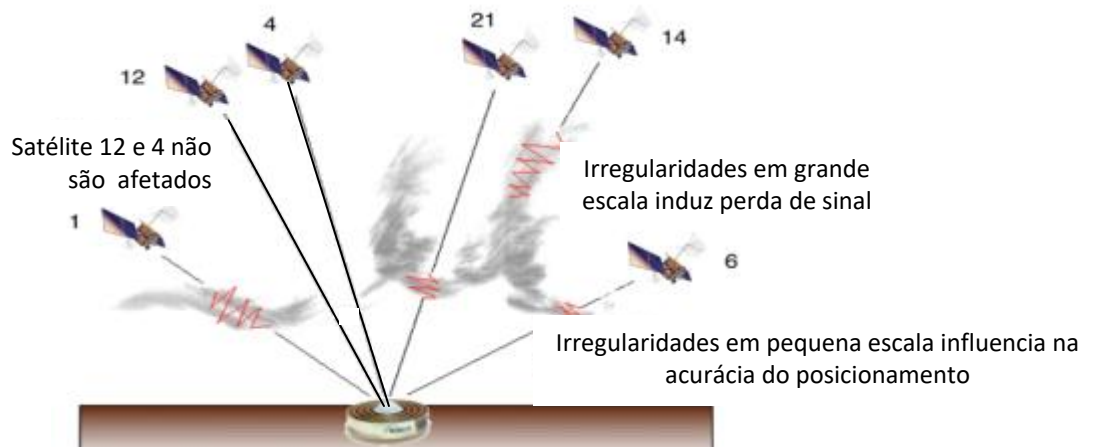
Figura 22– Localização da AMAS, em vermelho



Fonte: <http://thoth3126.com.br/amas-a-anomalia-magnetica-sobre-o-brasil/>. (Acesso em 10/12/14)

As irregularidades na ionosfera da Terra podem produzir variações de curtos períodos nos sinais, provocadas por rápidas flutuações na fase e amplitude, devido aos efeitos da difração e refração, que causam um enfraquecimento no sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra a perda do sinal (MATSUOKA, 2007; CONKER et al, 2003; RODRIGUES, 2003). Essas rápidas flutuações são chamadas de cintilação ionosférica e, normalmente, as irregularidades do TEC que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altitude (DE PAULA et al, 2008; CONKER et al, 2003; AGUIAR, 2010). A Figura 23 apresenta uma ilustração da influência da cintilação ionosférica no sinal GNSS. De acordo com Davies (1990), um sinal de rádio que atravessa a ionosfera será modificado por irregularidades do tamanho de poucos metros até quilômetros, podendo se tornar um problema severo ao ponto de inviabilizar o rastreamento do sinal.

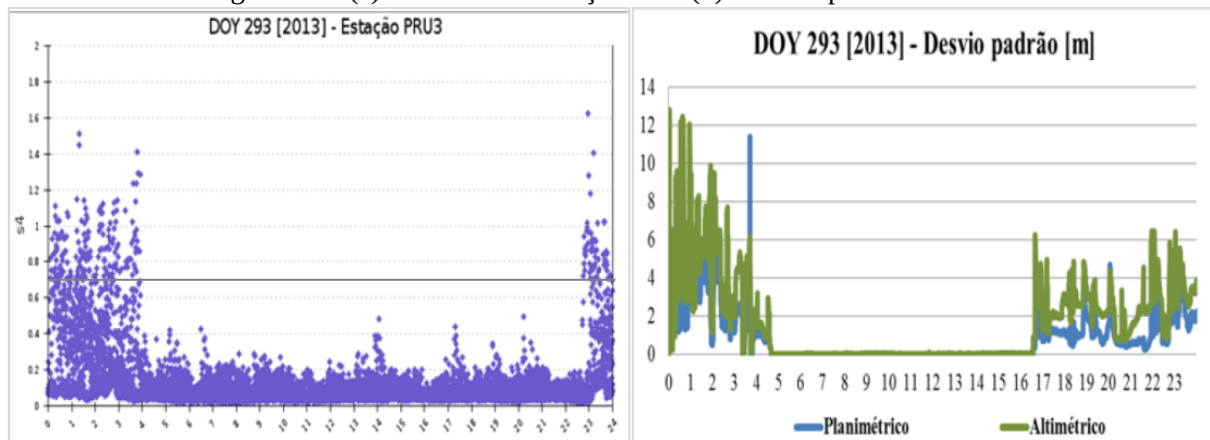
Figura 23– Impacto da Cintilação Ionosférica no Sinal GNSS



Fonte: Adaptado de <http://www.gpsworld.com/wp-content/uploads/2012/03/Fig4.jpg>. (Acesso em 12/03/2014)

Este processo tem início após o pôr do Sol, onde a densidade do plasma nas regiões mais baixas da ionosfera decresce com a recombinação dos íons. Os efeitos mais intensos da cintilação ionosférica ocorrem na faixa de 30° N a 30° S de latitude, de modo que os eventos de maior intensidade ocorrem na zona entre 10° N e 10° S de latitude a partir da linha do equador geomagnético, sendo que a cintilação nestas condições está relacionada com a anomalia equatorial (FONSECA JR, 2002; LANGLEY, 2014). Há eventos de cintilação, também, nas regiões onde ocorrem as auroras (65° até 75° de latitude geomagnética) devido às tempestades geomagnéticas ou magnetosféricas, e na região que envolve a capa polar (latitudes geomagnéticas maiores que 75°) (LANGLEY, 2011). De acordo com Conkeret al. (2003), quando o índice de cintilação S4 é maior que 0,707 os receptores podem perder quase ou totalmente o sinal transmitido pelos satélites, deteriorando assim o posicionamento (Figura 24).

Figura 24 – (a) Índice de Cintilação S4 e (b) Erro do posicionamento

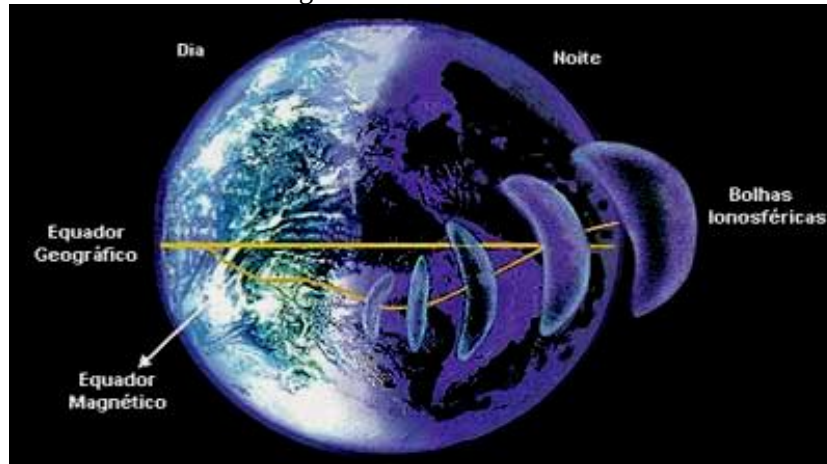


Fonte: SILVA, 2014.

A Cintilação ionosférica também pode ocorrer em regiões caracterizadas por depleções do plasma de larga escala, geralmente conhecidos como bolhas de plasma ou bolhas ionosféricas (Figura 25), que são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida (LANGLEY, 2014; DATTA-BARUA et al., 2003; WALTER et al., 2010). Ocorrem sempre após o pôr do Sol até a meia noite; não obstante, durante algumas fases do ano aparecem durante a noite toda até o amanhecer (SAHAI, FAGUNDES e BITENCOURT, 2000; DE PAULA, 2008; MATSUOKA, 2007). Essas irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em

degradação nos sinais de comunicação e nos sinais GNSS (SAHAI, FAGUNDES e BITENCOURT, 2000).

Figura 25 – Bolhas Ionosféricas



Fonte: www.faperj.br/downloads/bolhas_ionosfericas.doc. (Acesso em 23/05/2015)

No Brasil, as ocorrências de cintilações são mínimas de abril até agosto e máximas de setembro a março. Os horários de cintilação mais intensos são limitados à uma hora após o pôr do Sol, até aproximadamente à meia noite local.

Estimativas de cintilação ionosférica podem ser definidas em termos da densidade espectral da potência do sinal (*Power Spectral Density* - PSD) (CONKER et al., 2003). Índices específicos também podem ser produzidos, os quais denotam fatores de intensidade de cintilação ionosférica. Dois índices são mais destacados na literatura: o índice S4, para cintilações de amplitude, e o índice Sigma- ϕ (σ_ϕ), para cintilações de fase.

Irregularidades na densidade de elétrons podem causar uma difração no sinal, acarretando em rápidas flutuações na intensidade do mesmo, denominadas cintilações de amplitude (CONKER et al., 2003). Em alguns casos, as cintilações podem ser fortes a ponto de acarretar que a intensidade do sinal recebido seja inferior a um limiar de rastreamento do receptor, fazendo com que o receptor tenha que readquirir o sinal para tal satélite (DATTA-BARUA et al., 2003; WALTER et al., 2010), aspecto que prejudica o processo de solução das ambiguidades da fase da onda portadora (CONKER et al 2003; VANI, 2013).

O índice adotado para análises nesta dissertação foi de amplitude, o S4. Este índice é adimensional e alguns limiares para seu valor podem ser encontrados na literatura.

Conker et al. (2003) definem que um valor 0 indica ausência de cintilação, enquanto um valor 1 indica severa cintilação. Tiwari et al. (2011) apresenta três níveis de classificação para o referido índice:

- Cintilação forte: $S4 \geq 1$;
- Cintilação moderada: $0,5 < S4 < 1$;
- Cintilação fraca: $S4 \leq 0,5$.

Durante os eventos de cintilação, a performance do rastreamento em L1 é menos afetada que o rastreamento em L2. A perda do sinal em L2 afeta fortemente aplicações onde são necessárias observações de dupla frequência. Estas aplicações dependem, portanto, da natureza dispersiva da ionosfera, conseqüentemente, torna-se necessário monitorar as cintilações ionosféricas. No entanto, o desempenho do rastreio dos receptores GNSS não depende somente da atividade da cintilação ionosférica, mas também da capacidade de rastreamento destes receptores (SKONE, 2000; CONKER et al, 2003).

No Brasil, o monitoramento e a geração de mapas em tempo real da cintilação ionosférica e do TEC é realizado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) através do sistema SCINTEC. O SCINTEC é um *software* que utiliza dados da rede de receptores GPS CASCADE, desenvolvida pela Universidade de Cornell (USA). Além disso, é capaz de assimilar dados do receptor GPS através do uso de sistema de gestão de base de dados relacional. O SCINTEC está fazendo uma integração com o projeto LISN (*Low-latitude Ionosphere Sensor Network*) com a finalidade de prover mapas de cintilação e TEC sobre toda a América do Sul em tempo real. Para obter detalhes sobre o projeto, consultar <http://www.inpe.br/scintec/>.

Um diagnóstico diário da ionosfera sobre o território brasileiro é realizado pelo programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE) do INPE, onde a aquisições de dados são efetuadas por estações estrategicamente distribuídas no país, que incluem observatórios de rádio telescópio,, estações de receptor GPS, observatórios de ionosfera e estações de magnetômetro. Essa é uma iniciativa pioneira na região latino-americana que já apresenta resultados disponíveis ao público <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>>. Atualmente, o mapeamento do TEC é feito a cada 10 minutos ao longo das 24 horas, todos os dias da semana, e oferece uma visão mais ampla dos eventos que perturbam a ionosfera.

Outra iniciativa para estudar/modelar os efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS é o projeto denominado CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e o projeto CALIBRA, o qual foi submetido dentro da chamada FP7–GALILEO–2011–GSA–1a, realizada pela ESA (*European Space Agency* - <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/index.php>) e o projeto MIMOSA também financiado pela ESA (<http://roma2.rm.ingv.it/en/projects/international/104/MIMOSA>).

Estes projetos visam analisar os efeitos da cintilação, compreender suas causas e desenvolver novas técnicas a serem implementadas em receptores GNSS, que envolvem membros de diversas instituições da Europa e do Brasil, dentre as quais inclui a FCT/Unesp. No que concerne ao Projeto CIGALA/CALIBRA, foi desenvolvida a ferramenta ISMR Query Tool (VANI, 2013), que permite realizar consultas e análises sobre estes dados (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/calibra/index.php>).

2.4 Mitigação Ionosférica

Os receptores GPS de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato do mesmo ser dependente da frequência do sinal, através da combinação denominada *Ion-Free*. No entanto, mesmo assim os receptores de simples frequência (receptores com a portadora L1) são empregados no posicionamento GNSS, embora os resultados sejam afetados pelo efeito sistemático devido à ionosfera (AGUIAR, 2010). Além disso, vale ressaltar, que o erro ionosférico é um dos erros a ser modelado no posicionamento baseado em redes. Deste modo, vários modelos foram e vêm sendo desenvolvidos para minimizar os efeitos da ionosfera para melhorar a acurácia do posicionamento, como o modelo de Klobuchar, NeQuick, os GIMs (Mapas Globais da Ionosfera–MGIs), modelos regionais ou de Grade, modelos tridimensionais, entre outros.

No que diz respeito ao escopo do GNSS e efeitos ionosféricos, alguns trabalhos apresentaram importantes avanços na mitigação desse efeito no posicionamento, bem como no entendimento de suas variações espaciais e temporais, os quais serão relatados na sequência.

2.4.1 Modelos matemáticos que utilizam coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação

No que concerne aos modelos matemáticos envolvidos na correção do efeito da ionosfera no GNSS, cujos coeficientes são transmitidos com as mensagens de navegação, são o de Klobuchar (1996) e NeQuick (RADICELLA, 2009), para atender, especificamente, os usuários de receptores GPS e Galileo de simples frequência, respectivamente.

O modelo *Broadcast*, também conhecido por modelo de Klobuchar ou ICA (*Ionospheric Correction Algorithm* – Algoritmo de Correção Ionosférica), é o modelo mais utilizado, pois seus coeficientes são transmitidos com os sinais do GPS e seu algoritmo está implementado nos *softwares* comerciais. Esse modelo permite calcular o atraso ionosférico, ou seja, a correção ionosférica para a pseudodistância entre o satélite e o receptor, com base nos coeficientes do modelo, num total de oito (α_i e β_i , sendo $i = 0$ a 3). Vale ressaltar, que os coeficientes transmitidos nas mensagens de navegação são atualizados a cada 10 dias pelo Controle Principal do GPS, ou, com maior frequência, quando há mudanças significativas no valor médio de 5 dias do fluxo solar dentro do período de 10 dias (KLOBUCHAR, 1996).

O algoritmo empregado no modelo de Klobuchar para calcular a correção ionosférica das medidas feitas com a portadora L1, além dos oitos coeficientes representados em um polinômio de terceiro grau, utiliza a latitude e a longitude geodésica da estação, o azimuth, o ângulo de elevação do satélite e o tempo GPS da época de observação. A sequência detalhada deste algoritmo pode ser encontrada em Klobuchar (1996). De acordo com a literatura, o modelo compensa aproximadamente 50–60% do atraso ionosférico total em regiões de latitudes médias (AGUIAR, 2010; LEICK, 1995; MATSUOKA, 2007). Este modelo pode satisfazer, em geral, aplicações de navegação de baixa precisão. Outro ponto importante, é que o centro de análise do IGS (*International GNSS Service*), o CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), também gera os oito coeficientes para o modelo Klobuchar calculados com base nos dados GPS. Estes são distribuídos como um produto ionosférico adicional. O modelo com os coeficientes gerados pelo CODE é conhecido por *Klobuchar–Style*.

Assim como o GPS, o sistema Galileo também fornece suporte para usuários de receptores de simples frequência, fornecendo um modelo de correções ionosféricas, os quais são transmitidos nas mensagens de navegação do Galileo. Nesse caso, são apenas três parâmetros do modelo NeQuick. Este modelo foi desenvolvido no ICTP (Abdus Salam) na *Unniversity of Graz*

(RADICELLA, 2009). Segundo a documentação OS–SIS–ICD (2010), o modelo ionosférico corrige 70% do efeito da ionosfera sobre os sinais E5a, E5b, E6 e E1 transmitidos pelos satélites do Galileo.

No que diz respeito ao sistema GLONASS, este não disponibiliza na mensagem de navegação parâmetros para correção do efeito da ionosfera semelhantes aos sistemas GPS e Galileo. Já o Beidou, disponibiliza coeficientes e pode-se empregar o modelo Klobuchar (BEIDOU, 2013).

2.4.2 Mapas Ionosféricos

Os Mapas Ionosféricos, tanto Globais quanto regionais, são disponibilizados por diversos Centros no formato IONEX (*IONosphere map EXchange*). No que concerne aos Mapas Globais da Ionosfera (GIM–*Global Ionospheric Maps*), o IGS tem um grupo de trabalho para desenvolver modelos para serem utilizados na sua geração. Quatro centros de análise do IGS produzem estimativas do GIM no formato IONEX. As agências que contribuem com o IGS são (IGS, 2016):

- CODE: o TEC é modelado por uma expansão em harmônicos esféricos até grau e ordem 15, referido a uma estrutura de referência geomagnética solar. Os parâmetros da ionosfera, a cada 2 horas, são obtidos a partir de medidas da fase da portadora da rede global do IGS (240–260 estações). Considera a ionosfera como uma camada com altitude de 450 km;
- ESOC (*European Space Operations Center*): utiliza um modelo bi–dimensional considerando a ionosfera como uma única camada com altitude de 450km, empregando 185–230 estações, bem como um modelo baseado no perfil 3D de Chapman, com uma integração vertical usando uma função exponencial;
- JPL (*Jet Propulsion Laboratory*): a ionosfera é modelada numa estrutura de referência geomagnética solar usando *splines* bicúbicas numa grade esférica com 1280 triângulos esféricos. O filtro de Kalman é usado para resolver, simultaneamente, a tendência instrumental L1–L2 e o atraso vertical nos pontos de uma grade ionosférica. Os parâmetros são modelados como um processo estocástico, utilizando dados de 180–190 estações;

- UPC (*Polytechnical University of Catalonia*): utiliza um modelo tomográfico estocástico e a ionosfera é dividida em duas camadas, com altitude de 450 km e 1130km, sendo utilizados dados de 185 – 205 estações.

Os arquivos IONEX, de todos os GIMs citados, contêm os valores de VTEC com resolução espacial de $5^\circ \times 2,5^\circ$ em longitude e latitude, respectivamente, com resolução temporal de 2 horas e tempo de latência de 11 dias. Desta forma, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de quatro arquivos IONEX. Desde 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos Centros de Análise são combinados para gerar em um único arquivo IONEX, resultando então em cinco arquivos diários (ION, 2016; MATSUOKA e CAMARGO, 2002). Atualmente, já vem sendo disponibilizados mapas com latência menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS). Estes arquivos de cada centro de análise são disponibilizados pelo IGS, com acesso livre, no seguinte endereço eletrônico < <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> >.

A precisão média dos valores de VTEC fornecidos nos arquivos IONEX varia em função da região do globo, do número de estações GNSS utilizadas, entre outros fatores. Na América do Sul e, principalmente, no Brasil, a rede IGS é pouco densificada. A avaliação dos mapas de TEC do IGS pode ser encontrada em diversos trabalhos, dentre os quais pode-se citar: Armendariz, Matsuoka e Camargo (2002), Ortega, Alves e Aguiar (2014) entre outros.

Com base a rede de estações de referência do IGS (<http://www.igs.org/network/complete.html>), efetivamente, dentro da região brasileira existem apenas oito estações, localizadas em Brasília, Eusébio, Cachoeira Paulista, Porto Velho, Recife, São Luiz, Salvador e Curitiba.

Em um contexto mais regional, pode-se citar o Centro de Análise Ionosférica do SIRGAS, bem como mapas em tempo real fornecidos pelo EMBRACE do INPE, além de outros projetos que tem promovido a instalação de Centros de Análises da ionosfera, como o LISN (*Low-latitude Ionosphere Sensor Network*), coordenado pelo Instituto Geofísico do Peru.

Dentro deste contexto, o Centro de Análise Ionosférica do SIRGAS, localizado na Universidade Nacional de La Plata, produz mapas horários de VTEC de 2005 a 2013, para a região de cobertura da rede SIRGAS. Estes mapas ionosféricos são conhecidos como SIRGAS–UNLP e são calculados utilizando o modelo LPIM, o qual consiste num algoritmo para o cálculo de mapas de VTEC, baseado em observações coletadas de estações de referência. Diariamente

são utilizadas, aproximadamente, 50 estações para gerar os mapas regionais de VTEC. Neste modelo a ionosfera é representada utilizando os harmônicos esféricos (AZPILICUETA, 2006).

2.4.3 Modelos Empíricos

Dentre os modelos empíricos mais utilizados e pesquisados pode-se citar o modelo climatológico IRI (*International Reference Ionosphere*) e o modelo teórico PIM (*Parameterized Ionospheric Model*).

O IRI é um projeto internacional patrocinado pelo COSPAR (*COmmitee on SPace Research*) e pela URSI (*International Union of Radio Science*). Estas organizações formaram um Grupo de Trabalho no final dos anos sessenta para produzir um modelo padrão empírico da ionosfera, com base em todas as fontes de dados disponíveis. Para um determinado local, data e hora, o IRI descreve a densidade de elétrons, temperatura do íon, a composição de íon em altitude no intervalo de 50 a 2000 km, bem como o TEC. As principais fontes de dados para o IRI são a rede mundial de ionosondas², os radares *Incoherent Scatter* – Espalhamento Incoerente (Jicamarca, Arecibo, Millstone Hill, Malvern, St. Santin), e vários outros instrumentos a bordo de satélites e foguetes (BILITZA; REINISCH, 2008). Várias edições melhoradas do modelo são constantemente disponibilizadas. A versão mais atual disponível deste modelo é a de 2012 (<http://iri.gsfc.nasa.gov/>). Diversas extensões são planejadas, incluindo modelos para a deriva de íon, descrição da ionosfera polar, além de consideração dos efeitos das tempestades magnéticas. A formulação do IRI é descrita em detalhes em Bilitza e Reinisch (2008).

O PIM é um modelo da ionosfera e plasmático mundial baseado em uma combinação parametrizada de vários modelos teóricos regionais da ionosfera e um modelo plasmasférico empírico. Este modelo foi desenvolvido pela *Computation Physics, Inc.* e foi financiado pela *Battlespace Environment Division of the Air Force Research Laboratory* (AFRL) (<http://www.cpi.com/products/pim.html>), em função de quatro modelos físicos considerando a camada da ionosfera e a latitude, ou seja, um modelo da camada F em baixa latitude, um modelo da camada F em latitude média, um modelo da camada E combinando baixa e média latitudes, e

²Ionossonda é o nome genérico dado a sondadores ionosféricos que utilizam técnicas básicas de radar para detectar a densidade eletrônica do plasma ionosférico em função da altura. O equipamento emite pulsos de energia eletromagnética fazendo uma varredura em frequência entre 1 e 30 MHz (podendo atingir até 40 MHz), em passos de 50 ou 100 kHz. Através da medida do tempo decorrido entre o sinal emitido e o sinal refletido, uma ionossonda com transmissão vertical fornece um perfil de densidade eletrônica em função de altura (virtual). As ionossondas digitais possuem também capacidade de medir a fase do sinal e o seu deslocamento Doppler, possibilitando a obtenção de informação sobre a dinâmica da região ionosférica refletora.

finalmente um modelo para as camadas E e F em latitude alta. Diferentemente do IRI, o qual é baseado na climatologia empírica, o PIM é baseado na climatologia teórica e fornece perfis da composição de íon e densidade de elétrons a partir de modelo numérico baseado na física para várias condições geofísicas. A partir do PIM foi desenvolvido um modelo para aplicação em tempo real denominado de PRISM (*Parameterized Real-Time Ionospheric Specification Model*), o qual utiliza o PIM com dados obtidos de fontes espaciais e terrestres para atualizar o modelo climatológico em tempo quase real. Para a localização e condições geofísicas especificadas pelo usuário, o PIM produz perfis de densidade de elétrons para altitudes entre 90 e 2500 km (CPI, 2015).

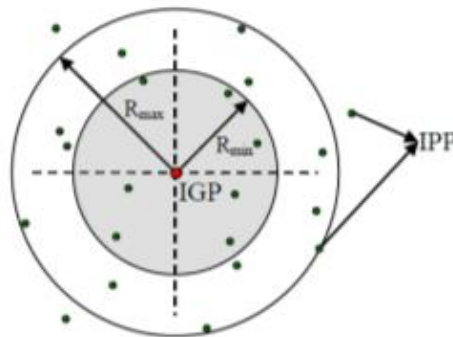
2.4.4 Modelos Bidimensionais

No que concerne aos modelos bidimensionais da ionosfera, estes podem ser classificados em modelos baseados em funções analíticas e os modelos baseados em grade. No que diz respeito ao primeiro modelo, pode-se citar aqueles que usam função de série de Taylor, função Polinomial (KOMJATHY, 1997), harmônicos Esféricos (SCHAER, 1999), série de Fourier (AGUIAR, 2005; CAMARGO, 1999 – Modelo Mod_Ion), Calibração do erro STEC (CIRAULO et al, 2007), entre outros. Em Matsuoka (2003), essas 4 funções matemáticas de modelagem, foram testadas e comparadas. Os resultados dos experimentos do posicionamento por ponto mostraram que as funções série de Fourier, de Taylor e a polinomial foram as mais eficazes na correção do efeito sistemático devido à ionosfera, proporcionando uma melhora média na acurácia da ordem de 79,5%, com valores médios de discrepâncias na resultante das coordenadas cartesianas melhores do que 3 m, sendo que a maior influência concentra-se na altitude.

Uma característica comum destes modelos bidimensionais é que eles mapeiam as medidas do atraso ionosférico inclinado para uma fina camada ionosférica localizada entre 300 e 450 km de altitude. A hipótese deste modelo é que toda a densidade de elétrons está concentrada neste intervalo, e conseqüentemente que o atraso ionosférico ocorre nesta fina camada. Além disso, os coeficientes das funções de modelagem podem ser estimados utilizando ajustamento pelos mínimos quadrados ou filtro de Kalman (AGUIAR, 2010).

No que concerne aos modelos baseados em grade³, cada ponto da grade (IGP – *Ionospheric Grid Point*) contém informações ionosféricas, definido numa fina camada ionosférica. Os IGPs estão localizados nas intersecções de linhas de latitude e linhas de longitude geodésica constante, espaçadas de 5 graus. Para a determinação do TEC é necessário obter o valor do atraso vertical dos quatro pontos do grid que circunvizinham o ponto sub-ionosférico (IP, ou em inglês IPP – *Ionospheric Pierce Point*) e de uma função peso que determina a contribuição de cada IGP para determinar o atraso ionosférico do IPP. Deste modo, vários algoritmos foram desenvolvidos devido às diferentes formas de ponderação (LIAO, 2000; AGUIAR, 2010). Segundo Aguiar (2010), uma etapa importante para a geração da grade ionosférica é a definição dos IPPs que serão utilizados no processo de interpolação. Para determinar os IPPs que são utilizados para estimar o atraso ionosférico do IGP, define-se um raio de busca (R_{max}) a partir do IGP (Figura 26).

Figura 26– Raio de Busca do IPPs



Fonte: AGUIAR (2010)

Deve-se salientar que quando se utiliza a grade ionosférica, tem-se uma grande quantidade de informações a serem transmitidas aos usuários, enquanto que nos modelos que não são baseados em grade são transmitidos somente os coeficientes das funções de modelagem.

³ O conceito básico de um modelo de grade é que a ionosfera a ser modelada seja coberta por pontos de grade.

2.4.5 Modelos Tridimensionais

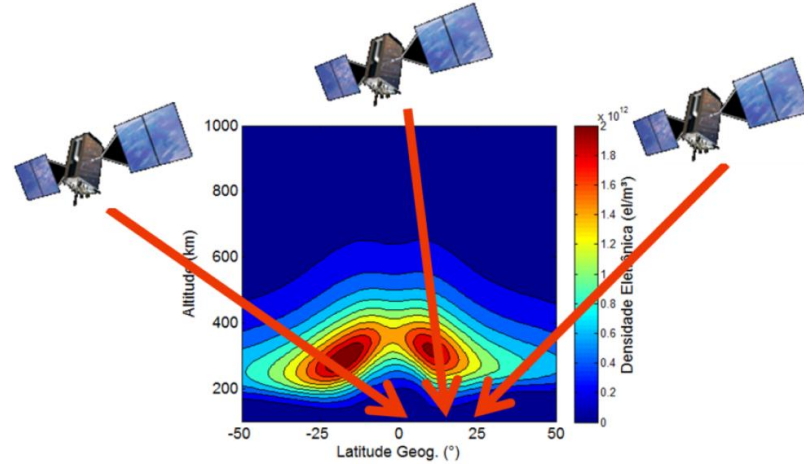
Devido algumas limitações dos modelos que consideram a ionosfera como uma fina camada, têm sido propostos os modelos tridimensionais como os modelos tomográficos (BLANCH; WALTER; ENGE, 2003; LIU, 2004) e modelos baseados em dados de ocultação GPS (GÁRCIA–FERNÁNDEZ ,2004; SOKOLOVSKIY, 2014).

A tomografia reconstrói o perfil de densidade de elétrons na ionosfera em função das medidas inclinadas (Figura27). O uso da técnica de tomografia em pesquisa ionosférica foi proposto, pela primeira vez, por pesquisadores da universidade de Illinois (Estados Unidos) em 1986 e, cujos resultados das simulações apresentaram valores de TEC calculados ao longo de várias trajetórias que representavam feixes de sinais eletromagnéticos que atravessam uma ionosfera previamente modelada. Ainda que tenha sido baseado somente em simulações numéricas, suas comparações entre os valores de densidade eletrônica reconstruída com os resultados do modelo original forneceram bases convincentes que validaram a aplicabilidade da técnica de imageamento ionosférico (AUSTEN et al., 1988 *apud* MUELLA, 2008). A maior parte do desenvolvimento da técnica de tomografia ionosférica aconteceu em altas e médias latitudes, principalmente, por que os principais estudos sobre esse tema foram desenvolvidos por grupos de pesquisa que localizados nestas latitudes. Por outro lado, em regiões equatoriais e de baixas latitudes, poucos estudos foram realizados até então, onde o foco tem sido no grande desafio de se reconstruir o perfil vertical de densidade eletrônica em regiões próximas a crista da anomalia equatorial, bem como a dinâmica da ionosfera nas regiões da crista (MUELLA, 2008; PROL, 2015).

Segundo Muella (2008), a tomografia é a técnica de inversão que consiste, basicamente, em reconstruir as características internas de um objeto (sua distribuição espacial), a partir das integrais de sua imagem projetadas numa dada direção. O princípio matemático da técnica de tomografia, na sua forma mais clássica, é baseado na transformada de Radon⁴.

⁴ Na matemática, a transformada de Radon avalia as integrais sobre linhas retas das propriedades de uma imagem (função), localizada dentro de um espaço físico (x, y), e as reproduz dentro do domínio de Radon.

Figura 27 – Geometria do GNSS utilizada na Tomografia Computadorizada da Ionosfera



Fonte: Prol (2015).

Outro modelo tridimensional utiliza a técnica de processamento de dados de GPS a bordo de Satélites de Baixa Órbita (*Low Earth Orbiters* ou LEO) (HEISE et al, 2003). Esta técnica permite fornecer resoluções com elevados perfis verticais de densidade de elétrons da ionosfera (bem como outros parâmetros relacionados com a atmosfera neutra – troposfera). Essa técnica se torna muito atraente por ser direta e simples. Detalhes sobre as formulações e parâmetros envolvidos podem ser encontrados em Gárcia–Fernández (2004) e Sokolovskiy e al. (2014). Há dois tipos de observações GPS que podem ser utilizadas para aplicar essa técnica, Ângulo de Flexão (*Bending Angle*) e STEC. No entanto, com advento de novos sinais e tecnologia GNSS estudos promissores, estão sendo realizados empregando dados da observável L2C para esta técnica (SOKOLOVSKIY et al, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o tema proposto, o qual serviu para aquisição dos fundamentos teóricos necessários para o estudo da ionosfera, bem como seu efeito no posicionamento e os modelos de mitigação disponíveis. Além disso, foram estudados aspectos relativos ao posicionamento GNSS, principalmente referente ao PPP e ao Posicionamento Baseado em Redes, empregando o conceito de VRS.

Nesta seção, serão descritos os materiais utilizados, bem como os métodos propostos para desenvolver os experimentos.

3.1 Materiais e Softwares

Para a realização dos experimentos no âmbito do posicionamento em rede será utilizado um sistema que vem sendo desenvolvido em linguagem C++ por pesquisadores da FCT/UNESP denominado VRS–Unesp (ALVES, 2008, 2011). Este sistema possui caráter científico para realizar RTK em Rede usando o conceito de VRS no modo pós–processado.

Em relação aos experimentos realizados para o posicionamento em redes, os dados de entrada para o sistema VRS–Unesp são:

- Arquivos de observação GPS no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) de uma rede de referência, no qual, optou-se por dados públicos das redes GNSS/SP e RBMC;
- Arquivos de efemérides precisas (no formato SP3) disponibilizadas pelo IGS.
- Arquivos no formato IONEX, disponibilizado por diversos centros como JPL, CODE, ESA, UPC, IGS, além de arquivos de projetos que investigam a ionosfera e cintilação ionosférica, por exemplo, o projeto MIMOSA, ou até mesmo provindos da grade ionosférica (AGUIAR, 2010).
- Arquivos de DCBs difundidos na *internet* pelos Centros de Análise do IGS.

Em relação à avaliação da qualidade dos dados das VRSs geradas no posicionamento baseado em redes será empregado o método de PPP através do *software online Canadian Spatial Reference System (CSRS–PPP)* desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* (NRCan), que processa dados GNSS no modo estático e cinemático

de simples ou dupla frequência, disponível em <<http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>>.

Optou-se por este *software online*, haja visto que o mesmo busca atualizações constantes, de modo que vários países, inclusive o Brasil, utiliza-o como base para serviços de PPP-*online*, como fornecido pelo órgão nacional, o IBGE.

Este mesmo *software* será utilizado no experimento que visa verificar a influência da cintilação ionosférica no posicionamento através de séries temporais de PPP, utilizando apenas L1 das estações de referência pertencentes à rede CIGALA/CALIBRA.

Mais especificamente em relação à cintilação ionosférica, será utilizado o banco de dados do projeto CIGALA/CALIBRA (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/index.php>), assim como a ferramenta *ISMR Query Tool* (VANI, 2013), com a finalidade de realizar consultas gráficas dos dados das estações pertencentes à rede. Além disso, foi utilizado para análises estatística destes dados o *software* R.

Vale ressaltar que para manipulação dos dados das estações e das VRS, foi utilizado o executável TEQC (*Translate/Edit/QualityCheck*). Para a plotagem dos dados e resultados foi empregado o *software* Gnuplot.

3. 2 Métodos

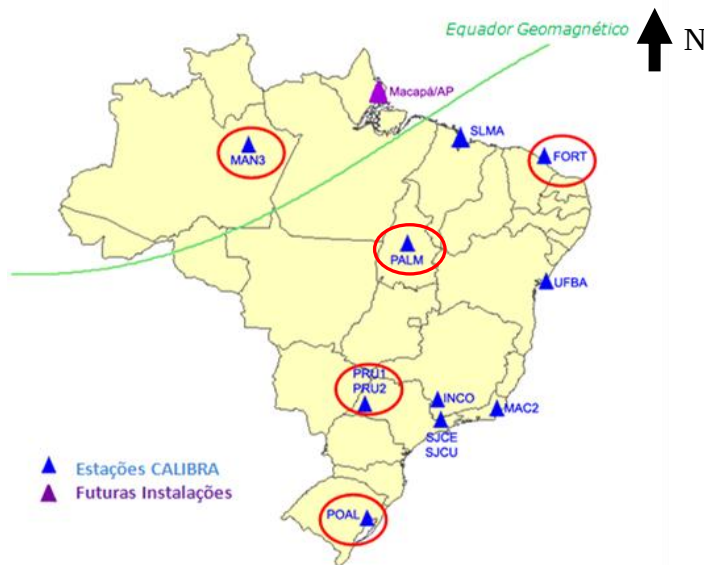
Visando atender os objetivos desta dissertação, foram realizados três experimentos com metodologias distintas. A seção 3.2.1, descreve o método utilizado para analisar o desempenho dos mapas ionosféricos no posicionamento baseado em redes em diferentes regiões brasileiras; a seção 3.2.2, descreve o procedimento adotado para comparar os modelos empregados nesta dissertação no sistema VRS_Unesp (Estimativa do TEC, Mapas Ionosféricos, e o modelo de Grade); e por fim, a seção 3.3.3, concerne ao método de avaliação do posicionamento sob a influência da cintilação ionosférica.

3.2.1 Emprego dos Mapas Globais da Ionosfera no posicionamento baseado em redes

As estações da rede RBMC estão distribuídas em diferentes regiões do Brasil, sendo possível avaliar, entre as estações, a influência da localização no posicionamento baseado em redes em períodos de alta e baixa atividade ionosférica.

Deste modo, a fim de avaliar a influência espacial do TEC, foram geradas VRSs em cinco regiões, Sul, Sudeste, Nordeste, Norte e Central do Brasil. Portanto, os dados das estações de referência da RBMC (Figura 28 (b)) empregados serão da estação POAL (Porto Alegre –RS), PPTE (Presidente Prudente –SP), NAUS (Manaus –AM), CEFT (Fortaleza –CE) e TOPL (Palmas – TO), respectivamente, para as estações- base da região Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Central. Vale ressaltar que o critério de escolha das estações base foi a proximidade das estações da Rede CALIBRA/CIGALA: MAN3, FORT, PRU1, POAL e PALM (Figura 28 (a)), com o objetivo de facilitar a análise da cintilação ionosférica, dentre outros parâmetros disponíveis na ferramenta *ISMR Query Tool*.

Figura 28 – Estações da rede CALIBRA/CIGALA (a), com destaque as estações próximas a rede RBMC (b)



(a)

Fonte: Adaptado de <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/stations/fixed.php?lan=en>.
Acesso em 07/01/2015



(b)

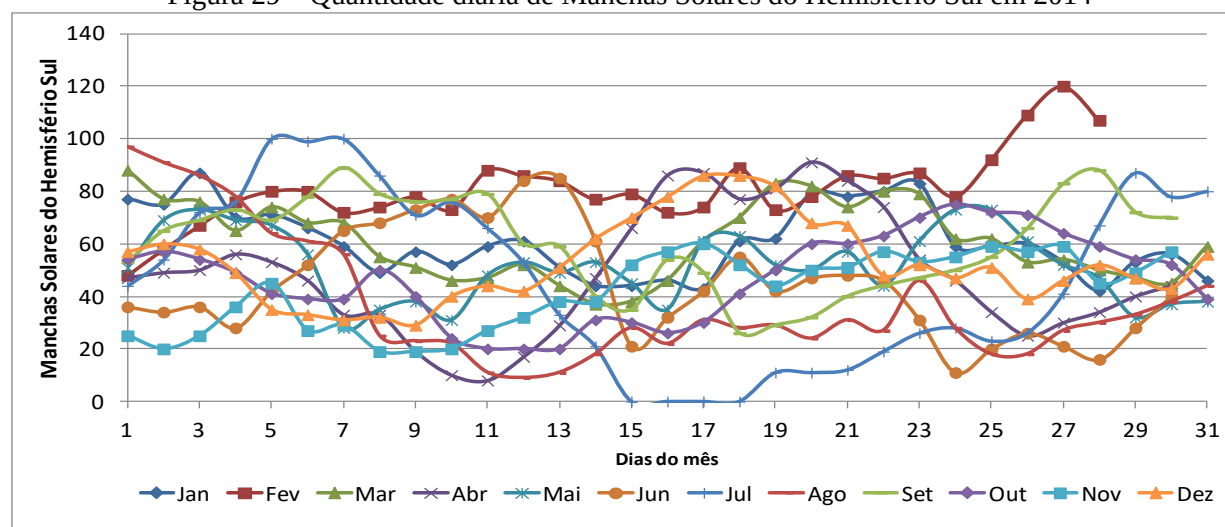
Fonte: Adaptado de <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/stations/fixed.php?lan=en>.
Acesso em 07/01/2015

Neste experimento, foram empregados dados de dez dias de intensa densidade de elétrons (24 à 28 de fevereiro e 24 à 28 de outubro), bem como dez dias de baixa intensidade

eletrônica (15 à 19 de julho e 19 à 23 de junho) de 2014. Vale ressaltar que a escolha foi de tal forma que a avaliação correspondesse a um período de alta atividade ionosférica dentro da variação do ciclo 24 de longo período (Figura 13 (b)), bem como apresentasse irregularidades ionosféricas. Neste sentido, foram empregados dados deste período que possibilitaram análises relativas à influência da variabilidade temporal do TEC, ou seja, a quantidade de manchas solares, cintilação ionosférica e variação sazonal.

A Figura 29 apresenta a quantidade de manchas solares do hemisfério sul. Nesta figura observa-se que, a quantidade de manchas solares no hemisfério sul no período de 24 à 28 de fevereiro destaca-se no ano de 2014, devido ao máximo de manchas solares, aproximadamente 120 manchas. Por outro lado, os dias de julho, destacam-se por ter o número mínimo de manchas em 2014, com 11 ou até mesmo a inexistência de manchas. Vale ressaltar, que especificamente neste critério o período de estudo de outubro não obteve destaque, porém este mês de equinócio, de acordo com a literatura, está associado a valores máximos da densidade de elétrons (OLIVEIRA, 2003; CAMARGO, 1999; MATSUOKA, 2007).

Figura 29 – Quantidade diária de Manchas Solares do Hemisfério Sul em 2014

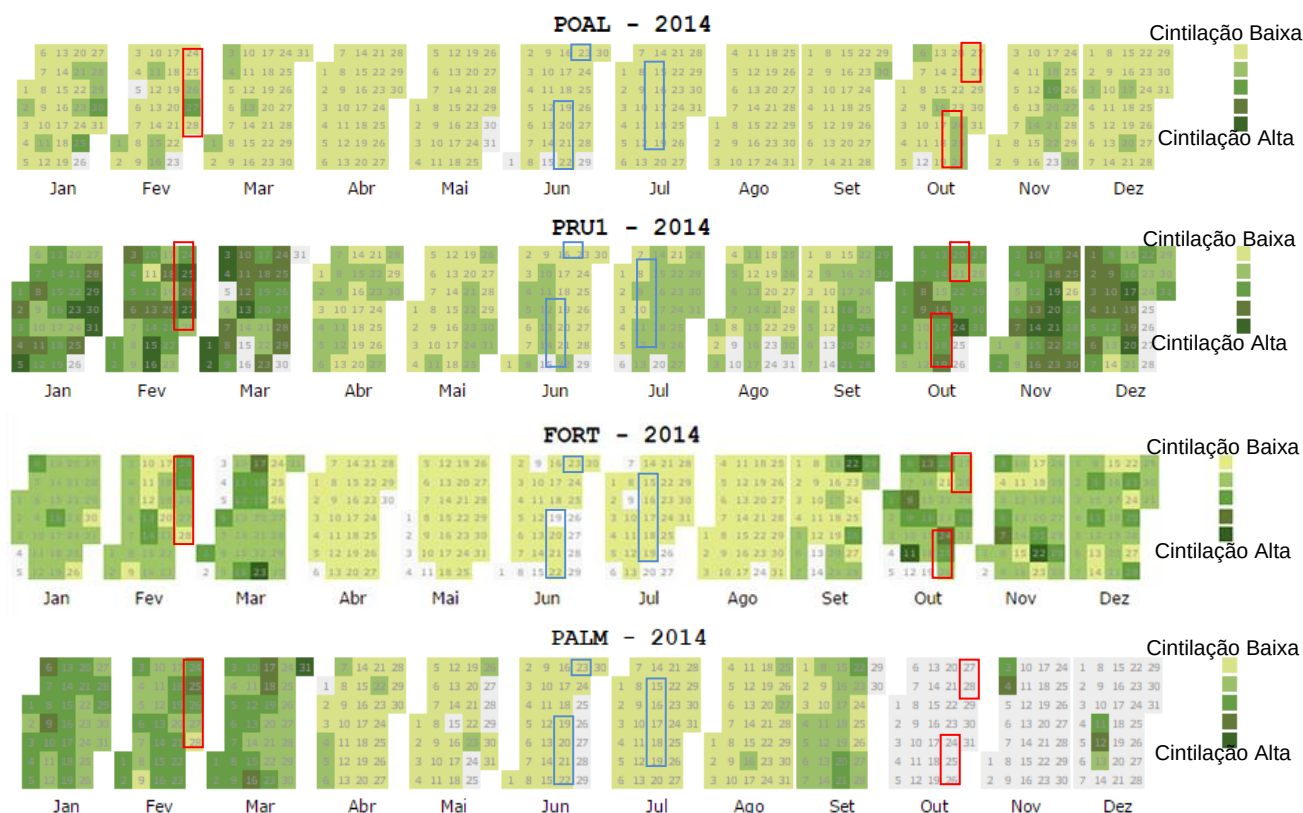


Fonte: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/sunspot-numbers/hemispheric/tables/hemispheric-sunspot-numbers_2014.txt. Acesso em 27/06/2015.

Na Figura 30, destaca-se em azul, a baixa influência da cintilação, no período de junho e julho, e em vermelho, a alta cintilação ionosférica, em fevereiro e outubro. Vale destacar, que a estação PRU1, mesmo em períodos de baixa densidade de elétrons apresenta

valores moderados de cintilação, isso pode estar ocorrendo pois se trata de uma região que sofre forte influência das bolhas ionosféricas e anomalias equatoriais.

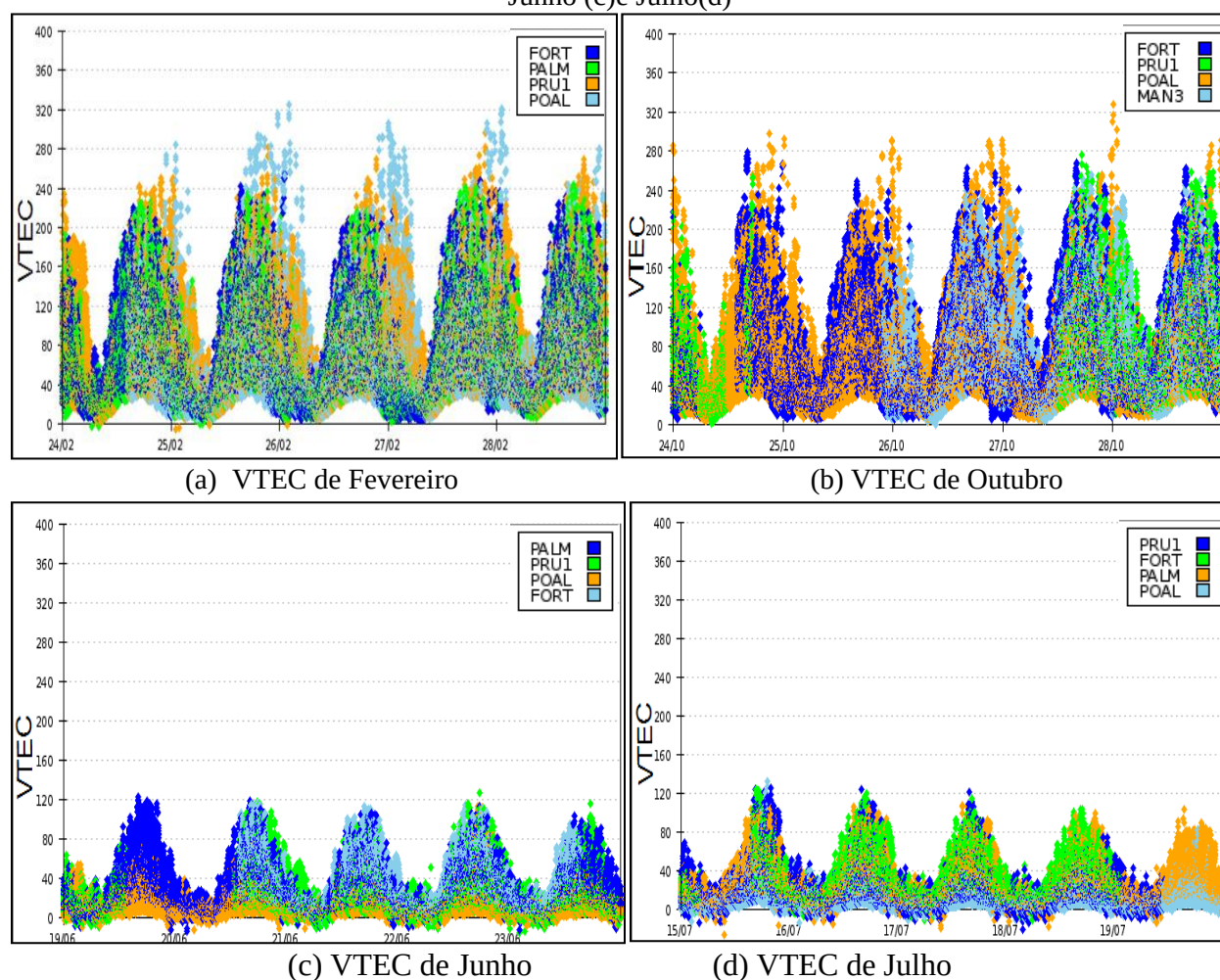
Figura 30 – Índice de Cintilação S4 Médio de 2014 das estações pertencentes a Rede CIGALA/CALIBRA das regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Central.



Fonte: Ferramenta ISMR Query Tool do Projeto CIGALA/CALIBRA <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/calendar-view/index.php>> (Acesso em 29/06/14)

Assim, como pode ser visto na Figura 31, os índices apresentados anteriormente influenciam diretamente o valor do VTEC, pois como sabe-se o TEC varia no tempo e espaço e é influenciado pelo ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica, irregularidades ionosféricas, atividade geomagnética, entre outros.

Figura 31 – VTEC considerando máscara de elevação maior que 10° em Fevereiro (a), Outubro (b), Junho (c) e Julho (d)



Fonte: Ferramenta ISMR Query Tool do Projeto CIGALA/CALIBRA <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/view/View.php>> (Acesso em 04/01/15)

As VRSs foram geradas considerando uma linha de base de aproximadamente 100 km. O Quadro 5 apresenta as coordenadas em SIRGAS2000, época 2014,00 das VRSs geradas por região de estudo.

Quadro 5 – Coordenadas das VRSs das regiões de estudo

Região	X (m)	Y(m)	Z(m)
Sul	3467183,919	-4357762,468	-3099983,456
Sudeste	3766102,240	-4567407,880	-2367310,354
Norte	3177310,225	-5512972,106	-437851,114
Nordeste	4970840,771	-3963437,412	-512189,938
Central	4246158,586	-4636214,957	-1073512,727

No que concerne à geração dos dados da VRS, foram utilizados os arquivos IONEX do CODE, ESA, JPL, UPC e IGS, para corrigir o efeito ionosférico. Nesse caso, somente os dados da estação-base foram empregados, pois utilizando os arquivos IONEX é possível interpolar os erros ionosféricos diretamente para a posição da VRS. Assim, para cada dia do período de estudo, foram gerados cinco arquivos de VRS no formato RINEX, de modo que todos foram corrigidos do efeito troposférico utilizando o modelo de *Hopfield* (MARQUES, 2012; MONICO, 2008). As denominações das estratégias utilizadas foram:

- VRS_CODE: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do CODE;
- VRS_ESA: com correção da ionosfera utilizando o IONEX da ESA;
- VRS_JPL: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do JPL;
- VRS_UPC: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do UPC;
- VRS_IGS: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do IGS – para as análises dos resultados obtidos com esse IONEX, foram considerados como referência, haja visto que o mesmo é a combinação dos demais Centros de Análises.

Posteriormente, os dados das VRSs foram processados no serviço gratuito de pós-processamento do NRCAN no modo cinemático a fim de evidenciar os efeitos ionosféricos no posicionamento, para validação e comparação dos resultados obtidos para cada centro de análise. Deste modo, é possível avaliar a performance dos mapas globais da ionosfera no posicionamento baseado em redes em um país que sofre diversas influências da ionosfera. Para análise, foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ – Equação 13), que proporciona o erro posicional cometido em cada época por época (por meio do arquivo de pos processamento .pos) e o valor médio diário (por meio do arquivo de pos processamento .sum), utilizando o *software* Gnuplot e o Excel, respectivamente. O cálculo do EMQ pode ser realizado, pois se conhece a coordenada no qual os dados da VRS devem ser gerados, como apresentado a seguir:

$$EMQ = \sqrt{\Delta X^2 + \sigma X^2} \quad (13)$$

Onde:

ΔX é a discrepância da coordenada

σX é o desvio padrão da coordenada

Além disso, neste experimento, foram avaliados os gráficos do VTEC e o índice de cintilação gerado no programa *ISMR Query Tool*. Esses gráficos foram produzidos com intuito de avaliar as variações diurnas do VTEC e do índice S4.

3.2.2 Comparação entre os modelos ionosféricos de estudo

Este experimento tem como finalidade analisar a qualidade da VRS empregando diferentes modelos para correção do efeito ionosférico, que inclui o modelo de estimativa do TEC, de Grade e de mapa ionosférico global na região brasileira. De modo que a escolha deste último foi realizada levando em consideração os resultados do experimento da seção 3.2.1. Cabe acrescentar que foram utilizados arquivos concedidos pelo projeto MIMOSA.

No entanto, neste experimento, foram consideradas duas frentes de estudo para comparação dos modelos. A primeira, concerne basicamente a mesma configuração adotada no experimento anterior (3.2.1), que será detalhada na seção 3.2.2.1. Na segunda, foram empregados dados referentes aos IONEX fornecidos pelo projeto MIMOSA, por este motivo, foram avaliados somente os dias de estudo condizentes com o projeto (seção 3.2.2.2).

3.2.2.1 Comparação entre os modelos de estimativa do TEC, Mapas Globais Ionosféricos e o modelo de Grade.

Neste experimento, as VRSs foram geradas na mesma posição descrita no Quadro 5 e foram mantidas as estações base POAL, PPTE, FORT, NAUS e TOPL (Figura 28(b)) de modo que as linhas de base foram fixadas em uma distância aproximada de 100 km. Os dados da VRS foram gerados utilizando as seguintes estratégias para correção ionosférica:

- VRS_GLOBAL: com correção da ionosfera utilizando o IONEX global⁵, com resolução espacial e temporal de 2,5°x5° e 2 horas, respectivamente;
- VRS_GRADE: com correção da ionosfera utilizando o IONEX do modelo de Grade (AGUIAR, 2010), com resolução espacial e temporal de 2°x2° e 10 minutos, respectivamente;
- VRS_ETEC: com correção da ionosfera utilizando estimativa do TEC;

No que diz respeito ao Mapa Regional da Ionosfera obtidos através do modelo de Grade, os valores são gerados a partir do processamento de dados GPS de estações da RBMC. Nesse modelo (AGUIAR, 2010), o VTEC é modelado no referencial⁶ geomagnético solar e a

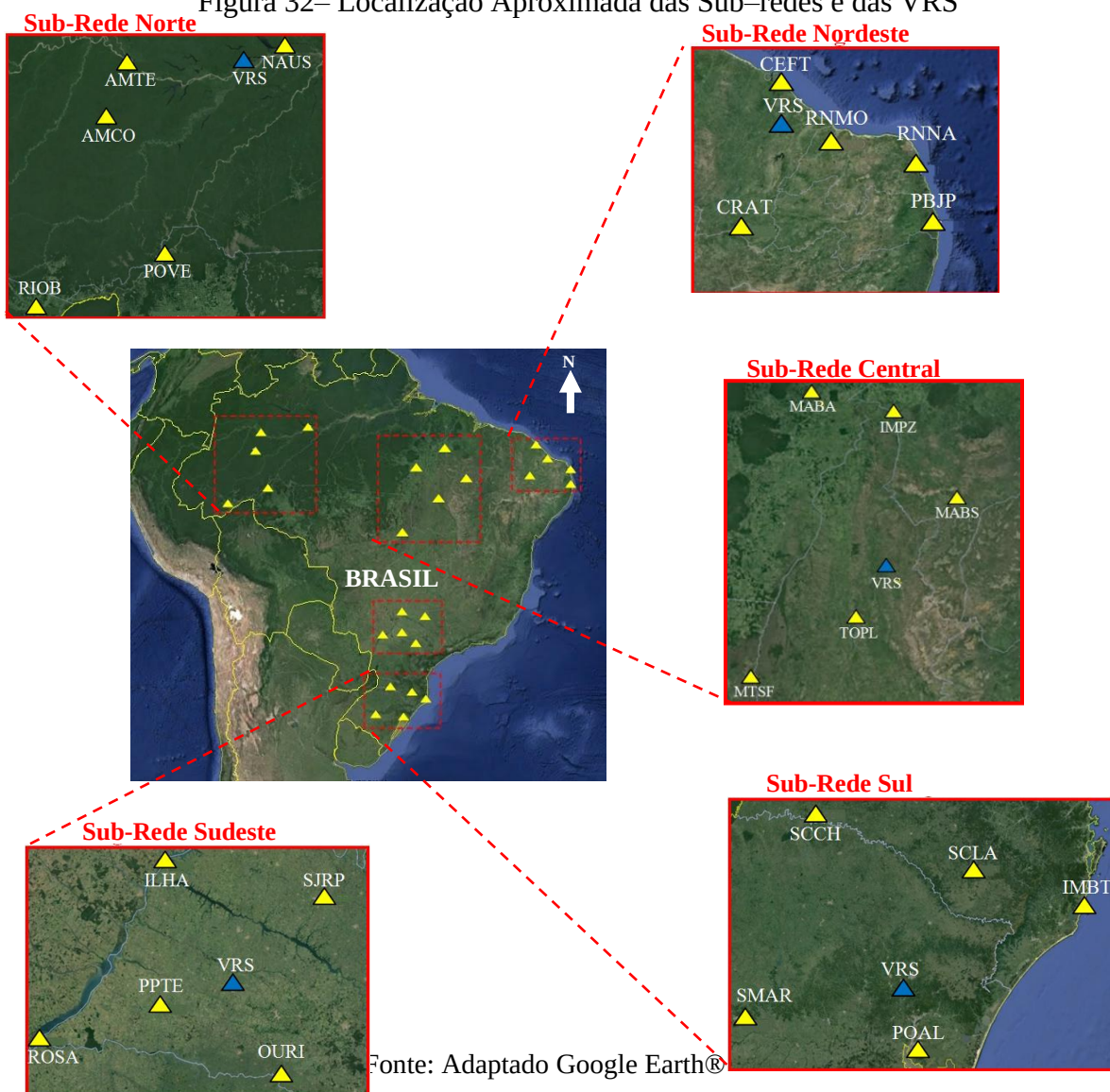
⁵Mapa Global Ionosférico com melhor desempenho por região brasileira, discutido na seção 3.2.1.

⁶ Considera a linha Sol-Terra e o Dipolo para a orientação dos eixos e tem períodos de rotação diária e anula em relação as coordenadas inerciais. Sistema é muito utilizado para modelar dados fortemente controlados pelo Campo Magnético da Terra.

grade é gerada usando uma função de interpolação adaptativa que varia de acordo com o número de pontos ionosféricos (IP) observados, podendo ser polinomial, ajuste do plano e inverso da distância ponderado pela decorrelação espacial do VTEC. Além disso, para estimar os coeficientes de interpolação é adotado o algoritmo do Filtro de Kalman. No que concerne as tendências instrumentais dos satélites e receptores (DCBs), são estimadas utilizando um polinômio de segunda ordem cujos coeficientes são estimados época por época empregando o filtro de Kalman.

No que concerne a estratégia VRS_ETEC, os erros atmosféricos estimados para as VRSs foram gerados com base nos dados das sub-redes nacionais (Figura 32): Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Central.

Figura 32– Localização Aproximada das Sub-redes e das VRS



- Sul: estações POAL (Porto Alegre – RS), SCCH (Chapeco –SC), SCLA (Lages –SC), IMBT (Imbituba –SC) , SMAR (Santa Maria – RS);
- Sudeste: estações PPTE (Presidente Prudente – SP), ILHA (Ilha Solteira – SP), OURI (Ourinhos – SP), ROSA (Rosana – SP), SJRP (São José do Rio Preto – SP);
- Nordeste: estações CEFT (Fortaleza – CE), CRAT (Crato – CE), PBJP (João Pessoa – PB), RNNA (Natal – RN), RNMO (Mossoró – RN);
- Norte: estações NAUS (Manaus – AM) , AMTE (Tefé – AM), AMCO (Coari – AM) , RIOB (Rio Branco – AC), POVE (Porto Velho – RO);
- Central: estações TOPL (Palmas – TO), MTSF (São Felix do Araguaia – MT), MABA (Marabá – PA), MABS (Balsas–MA) e IMPZ (Imperatriz – MA)

Vale ressaltar que os dados destas estações foram empregados visando utilizar a melhor configuração nacional existente para realizar o RTK em rede, pois como se pode notar na Figura 32, bem como a Figura 1, as distâncias entre as estações variam devido a RBMC não ser uma rede homogênea, justificando o fato de fixar o tamanho da linha de base das sub-rede em uma distância relativamente longa, de modo a não beneficiar os resultados de uma região mais densificada. Além disso, neste experimento, empregam-se arquivos globais com grande resolução espacial de $2,5^\circ \times 5,0^\circ$ (aproximadamente 277 km x 557 km).

Para avaliar a performance dos modelos no posicionamento baseado em redes foram analisados os resultados do PPP das VRS geradas no modo cinemático, utilizando o serviço gratuito para pós-processamento de dados GNSS, o NRCan. Posteriormente, foram calculados os valores do EMQ, para obter o erro posicional cometido no posicionamento por ponto em cada época, assim como, o valor médio diário.

Além disso, foram avaliados os gráficos do índice de cintilação S4, a fim de relacionar o efeito da cintilação ionosférica com o posicionamento.

3.2.2.2 Comparação entre os Mapas Globais da Ionosfera do IGS e os Mapas do projeto MIMOSA.

Diferentemente do experimento anterior (seção 3.2.2.1), este experimento avaliará somente a região sudeste, já que a mesma localiza-se sob região que está associada ao efeito da descida do plasma, causado pelo efeito fonte, ndo. Outra justificativa é o fato dos

arquivos IONEX fornecidos pelo projeto MIMOSA serem arquivos regionais, que abrangem somente o estado de São Paulo.

Portanto, foi empregada a estação base PPTE e a VRS foi gerada na posição da estação SPAR (Araçatuba–SP), resultando em uma linha de base de 140 km. Vale ressaltar que os arquivos do projeto MIMOSA foram adicionados nesta dissertação já que os mesmos podem resultar em análises interessantes, já que consideram índices de cintilação ionosférica para gerar os IONEX, além de possuir uma resolução espacial de um grau e temporal de 5 minutos.

Assim, foram empregados os 23 dias de estudo em concordância com os IONEX do projeto MIMOSA que envolvem dias de alta (Março e Abril) e baixa (Junho) densidade elétrons de 2014 e 2015, conforme apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Dias de Estudo do projeto MIMOSA

Ano	Dias de Estudo	Dias do Ano
2015	1 à 3 de Março	60 à 62
	29 de Março	88
	17 à 24 de Março	76 à 83
2014	10 à 15 de Abril	100 à 105
	6 à 10 de Junho	157 à 161

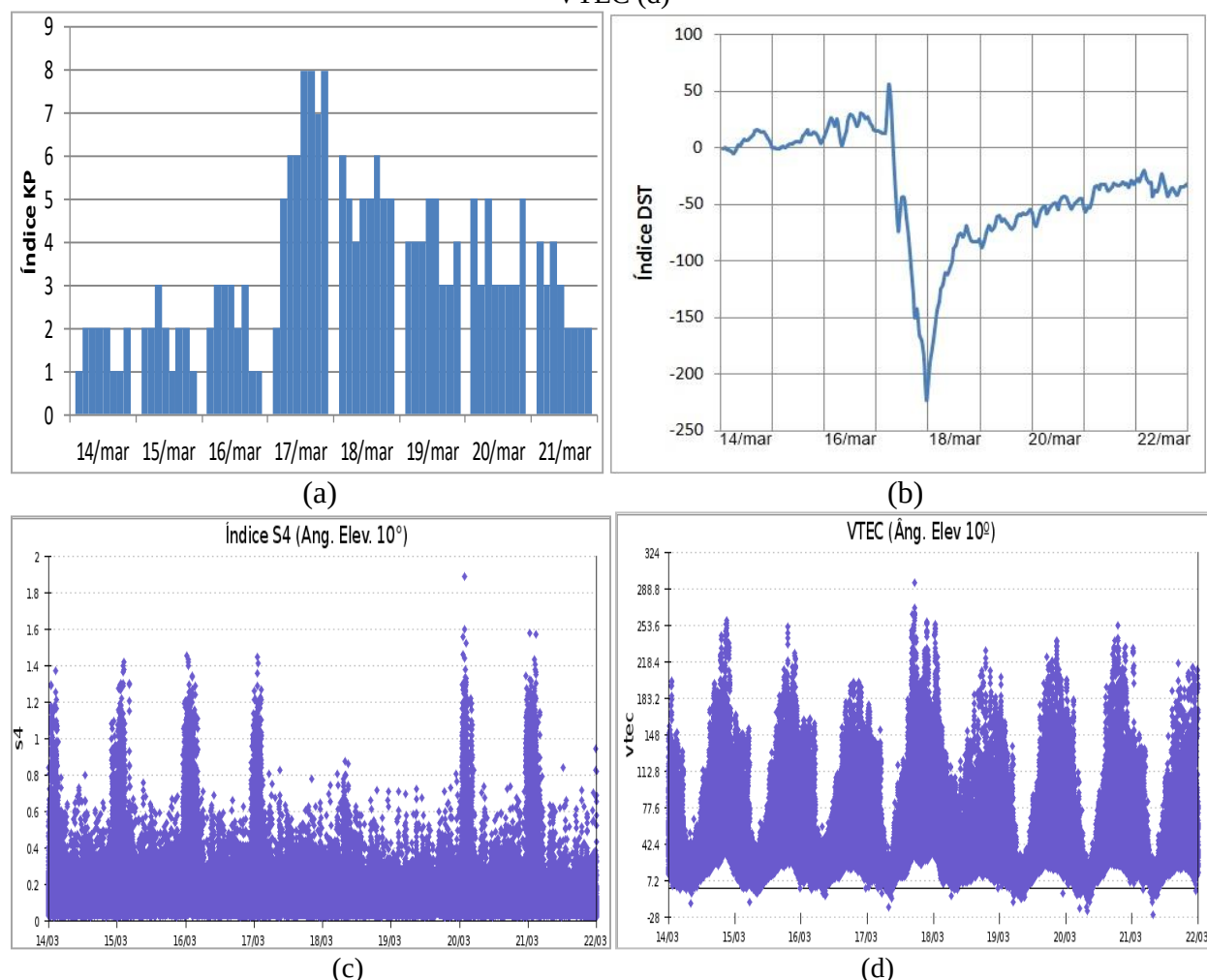
Vale ressaltar que em 17 de março de 2015 ocorreu uma forte tempestade geomagnética, conforme o índice geomagnético Kp (Figura 33 (a)) e DST (Figura 33 (b)), dias antes e após a tempestade geomagnética. No entanto, como pode ser visto da Figura 33 (c), este fato provocou uma inibição na cintilação ionosférica para a estação PRU1, após o por do sol do dia 17 até dia 19 de março de 2015.

Para cada dia de estudo, foram avaliados três tipos de arquivos do projeto MIMOSA, que diferem pelo método de interpolação, *Natural neighbor* (N), *Cubic* (C) e *Lowess*(L). Assim, os dados da VRS foram gerados utilizando as seguintes estratégias para correção ionosférica:

- VRS_IGS: correção ionosférica através do IONEX global do IGS, já que é a combinação dos demais centros de análises.
- VRS_C: correção ionosférica através do IONEX do projeto MIMOSA, *Cubic*;
- VRS_L: correção ionosférica através do IONEX do projeto MIMOSA, *Lowess*;
- VRS_N: correção ionosférica através do IONEX do projeto MIMOSA, *Natural neighbor*;

No que diz respeito à avaliação das VRSs geradas, foi utilizada a mesma estratégia apresentada nos experimentos anteriores.

Figura 33 – Índices Geomagnéticos: Kp (a) e DST (b); e Índice de Cintilação Ionosférica S4 (c) e VTEC (d)



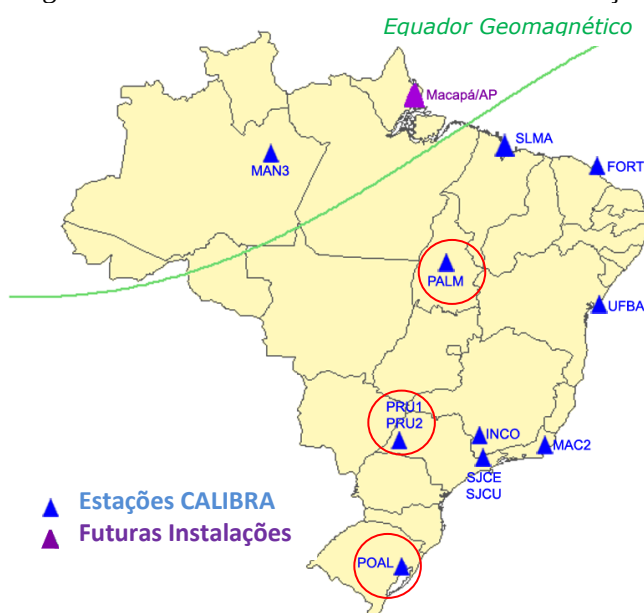
Fonte: Adaptado de <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/> (a),
 Adaptado de <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/dstssn/>> (b) e
 <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/view/View.php#>> (c) e (d).
 Acesso em 25/12/2015

3.2.3 Desempenho do posicionamento sob influência da cintilação ionosférica no Brasil

Nesta seção são apresentados os métodos empregados para analisar a influência do efeito da cintilação ionosférica no posicionamento, a partir de análises de correlações visual e numérica entre o erro no posicionamento e o índice de cintilação ionosférica.

Para este experimento foram utilizados dados de estações de referência pertencentes à Rede CIGALA/CALIBRA: PRU2, PALM e POAL (Figura 34). Estando a primeira localizada em uma região que sofre grande influência da cintilação ionosférica, haja visto que está localizada próxima a latitude geomagnética -22° , região esta que sofre grandes efeitos ionosféricos. No que concerne a segunda (PALM), trata-se de uma estação que está espacialmente relacionada com elevação dos elétrons do efeito fonte, ou seja, próximo a linha do equador geomagnético, sofrendo menor influência da ionosfera. A última estação (POAL) está localizada em uma região que é considerada relativamente livre de efeito ionosférico, a região das médias latitudes.

Figura 34– Rede CIGALA/CALIBRA e a localização da estação PRU2



Fonte: Adaptado de <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/stations/fixed.php> (Acesso em 14/01/2016)

Deste modo, para avaliar o impacto da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS, foram selecionados dados de todo o ano de 2012, 2013 e 2014 (pico do ciclo solar 24) destas estações. Assim, foi possível também avaliar a influência do pico no posicionamento.

Sendo Assim, foram empregados os índices de cintilação ionosférica S4 maiores que 0,5 através de *script* que acessa o banco de dados do projeto CIGALA/CALIBRA pela ferramenta *ISMR Query Tool – Retrieval*. Além disso, também foi empregado, o índice de

cintilação médio diário dos satélites GPS, condizentes com os valores disponibilizados pelo *ISMIR Query Tool –Calendar View* das estações de estudo disponível em http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is_ismrtool/calendar-view/tmp. Posteriormente, foi desenvolvido um *script* no Gnuplot para plotar os índices S4.

No que concerne ao posicionamento, foi realizado para o mesmo período o posicionamento por ponto (PPP) das estações, cujos dados foram baixados no banco de dados do CIGALA/CALIBRA automaticamente através de um *script*. Posteriormente, ainda foram empregados três *Scripts*, um para retirar as observáveis L1, L2, e P2 do arquivo de observação através do executável TEQC, outro para processar os dados no serviço on-line do NRCAN, e, finalmente, um para ler o arquivo com os resultados (discrepância e desvio-padrão) do processamento (.SUM), para que a partir destes fosse possível calcular o EMQ.

Em um primeiro momento, foi realizada uma análise visual associando a série do EMQ tridimensional do PPP com índice de cintilação S4. No entanto, para análises estatística, foi indispensável a manipulação dos dados de cintilação extraído do banco de dados do CIGALA/CALIBRA, já que era necessário relacionar apenas um único valor diário concernente a cintilação e o EMQ 3D. Deste modo, foi empregada a média ponderada diária do índice, incluindo apenas os satélites que apresentavam valores de cintilação maiores que 0,5 (cintilação forte), onde foi atribuído para $0,5 < S4 < 0,7$; $0,7 < S4 < 1$; $S4 > 1$, os pesos 1, 2 ou 3, respectivamente. Para análise e cálculo da correlação foi utilizado o *software* matemático e estatístico R, empregando o método disponível em seu pacote de correlação, *Spearman*⁷, devido a assimetria dos dados.

Além disso, foram analisados os mapas de cores da coerência *wavelet*⁸, que é uma técnica baseada na transformada de *Wavelet* Contínua e permite detectar semelhanças e correlações entre duas grandezas temporais. Deste modo, foi possível analisar por meio desta técnica como o EMQ e o índice de cintilação estão correlacionadas.

⁷ Função estatística disponível no software R para *estimar* uma medida baseada no grau de associação/correlação, recomendado para os dados quando não tiverem, necessariamente, uma distribuição normal bivariada. Mais detalhes em Lira(2004), NASON (1995 e 2008).

⁸ Método Estatístico empregado para análises de correlações. Consultar Gurgel (2013), Rosch & Schmidbauer (2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos experimentos que foram realizados, descritos na seção anterior (3.2.1 – 3.2.3).

4.1 Avaliação da performance dos Mapas Globais da Ionosfera no posicionamento baseado em redes

Nessa seção, são apresentados os resultados e análises do experimento para avaliar o desempenho dos Mapas Ionosféricos (arquivos IONEX) descritos na seção 3.2.1. As Figura 35 à Figura 39 apresentam os resultados do EMQ 3D do PPP no modo cinemático para o período de estudo para as regiões Nordeste, Norte, Central, Sul e Sudeste, respectivamente, juntamente com as Tabela 1 à Tabela 5, que destacam o melhor (Azul) e o pior (Vermelho) mapa empregado. Com base nestas figuras e tabelas é possível verificar a influência do efeito sazonal do TEC na qualidade da VRS na maioria das regiões, pois os meses com densidade de elétrons relativamente baixa, junho e julho, resultaram em um EMQ 3D diário de 13,9 cm, 24 cm, 56,9 cm, 7,2 cm e 18,9 cm para o período de junho para as regiões Nordeste, Norte, Central, Sul e Sudeste, respectivamente. Do mesmo modo, porém referente a julho, apresentou valores 11,3 cm, 11,9 cm, 58,2 cm, 5,6 cm e 18,8 cm de EMQ 3D. Por outro lado, o período de alta densidade eletrônica na ionosfera, Fevereiro e Outubro, apresentaram valores 23,13 cm, 17,6 cm, 57,3 cm, 27,7 cm e 66,1cm referente ao EMQ3D do período de Fevereiro e 21,8 cm, 26,2 cm , 57,2 cm, 28,1cm e 55,5 cm para Outubro.

Figura 35 – EMQ 3D do PPP (em m)diário da região Nordeste para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons

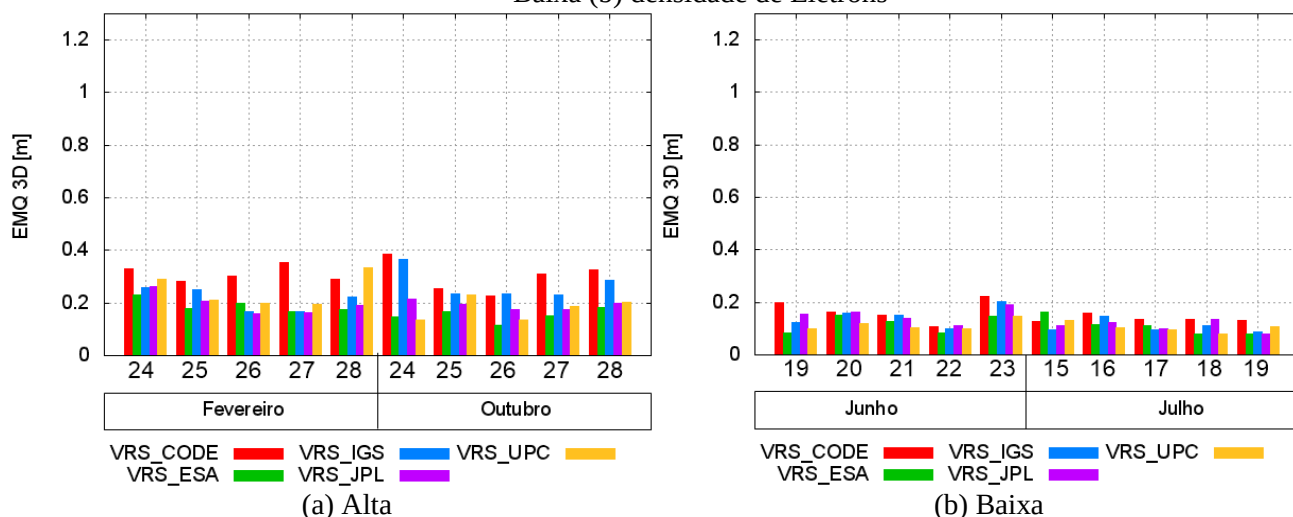


Tabela 1–Tabela – EMQ 3D do PPP (em m) diário da estratégias da região Nordeste

Alta	Dia	24/fev	25/fev	26/fev	27/fev	28/fev	24/out	25/out	26/out	27/out	28/out
	VRS_CODE	0,3291	0,2813	0,3015	0,3524	0,2892	0,3865	0,2527	0,2254	0,3108	0,3252
	VRS_ESA	0,2295	0,1802	0,1979	0,1671	0,1739	0,1468	0,1664	0,1140	0,1496	0,1827
	VRS_IGS	0,2593	0,2511	0,1682	0,1686	0,2244	0,3643	0,2331	0,2328	0,2287	0,2853
	VRS_JPL	0,2624	0,2061	0,1587	0,1622	0,1928	0,2159	0,1936	0,1736	0,1769	0,1982
	VRS_UPC	0,2890	0,2105	0,1989	0,1939	0,3348	0,1351	0,2304	0,1336	0,1850	0,2029
Baixa	Dia	19/jun	20/jun	21/jun	22/jun	23/jun	15/jul	16/jul	17/jul	18/jul	19/jul
	VRS_CODE	0,2008	0,1625	0,1492	0,1059	0,2218	0,1276	0,1603	0,1359	0,1358	0,1315
	VRS_ESA	0,0837	0,1516	0,1253	0,0849	0,1451	0,1615	0,1158	0,1094	0,0804	0,0804
	VRS_IGS	0,1217	0,1594	0,1523	0,1007	0,2026	0,0958	0,1464	0,0937	0,1107	0,0882
	VRS_JPL	0,1552	0,1647	0,1396	0,1121	0,1896	0,1094	0,1227	0,0996	0,1370	0,0812
	VRS_UPC	0,0994	0,1180	0,1041	0,0980	0,1462	0,1315	0,1034	0,0971	0,0799	0,1090

Figura 36 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons

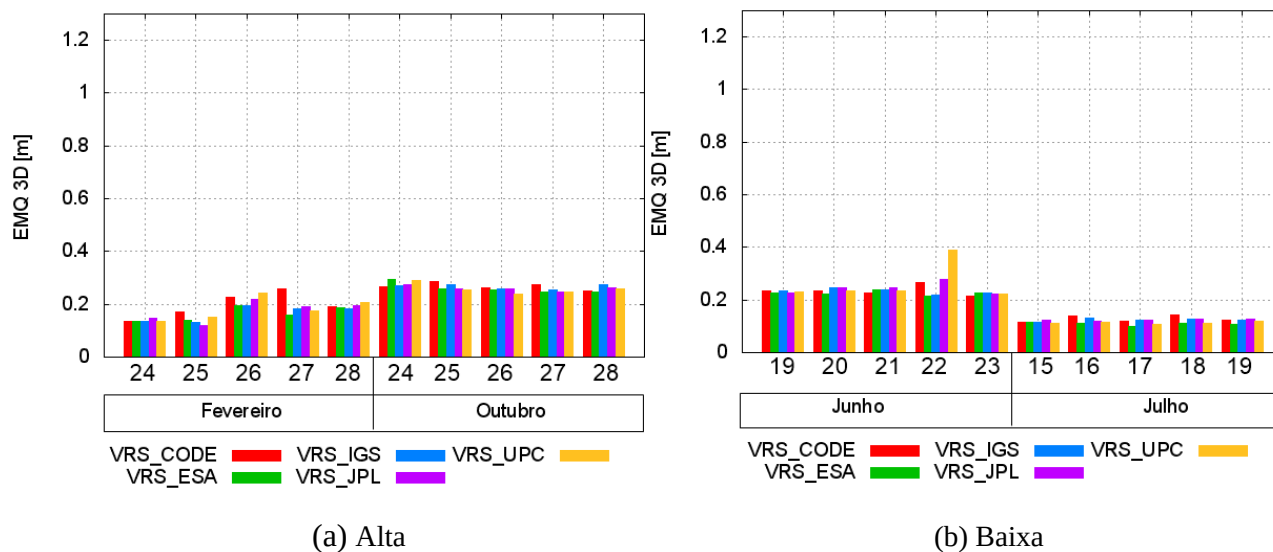


Tabela 2– EMQ 3D do PPP (em m) diário da estratégias da região Norte

Alta	Dia	24/fev	25/fev	26/fev	27/fev	28/fev	24/out	25/out	26/out	27/out	28/out
	VRS_CODE	0,1360	0,1717	0,2262	0,2593	0,1923	0,2656	0,2859	0,2622	0,2732	0,2523
	VRS_ESA	0,1350	0,1392	0,1934	0,1585	0,1864	0,2935	0,2583	0,2525	0,2479	0,2466
	VRS_IGS	0,1369	0,1314	0,1938	0,1816	0,1811	0,2694	0,2762	0,2574	0,2561	0,2759
	VRS_JPL	0,1454	0,1196	0,2185	0,1892	0,1958	0,2740	0,2573	0,2580	0,2472	0,2614
	VRS_UPC	0,1342	0,1498	0,2436	0,1743	0,2087	0,2893	0,2550	0,2389	0,2483	0,2573
Baixa	Dia	19/jun	20/jun	21/jun	22/jun	23/jun	15/jul	16/jul	17/jul	18/jul	19/jul
	VRS_CODE	0,2352	0,2337	0,2272	0,2647	0,2127	0,1161	0,1399	0,1208	0,1412	0,1225
	VRS_ESA	0,2265	0,2236	0,2387	0,2166	0,2266	0,1154	0,1095	0,0990	0,1130	0,1056
	VRS_IGS	0,2327	0,2477	0,2381	0,2174	0,2255	0,1148	0,1320	0,1218	0,1265	0,1226
	VRS_JPL	0,2247	0,2472	0,2465	0,2791	0,2239	0,1239	0,1202	0,1234	0,1281	0,1268
	VRS_UPC	0,2303	0,2329	0,2341	0,3913	0,2237	0,111	0,1134	0,1055	0,1101	0,1175

Figura 37 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Alta (a) e Baixa (b)
densidade de Elétrons

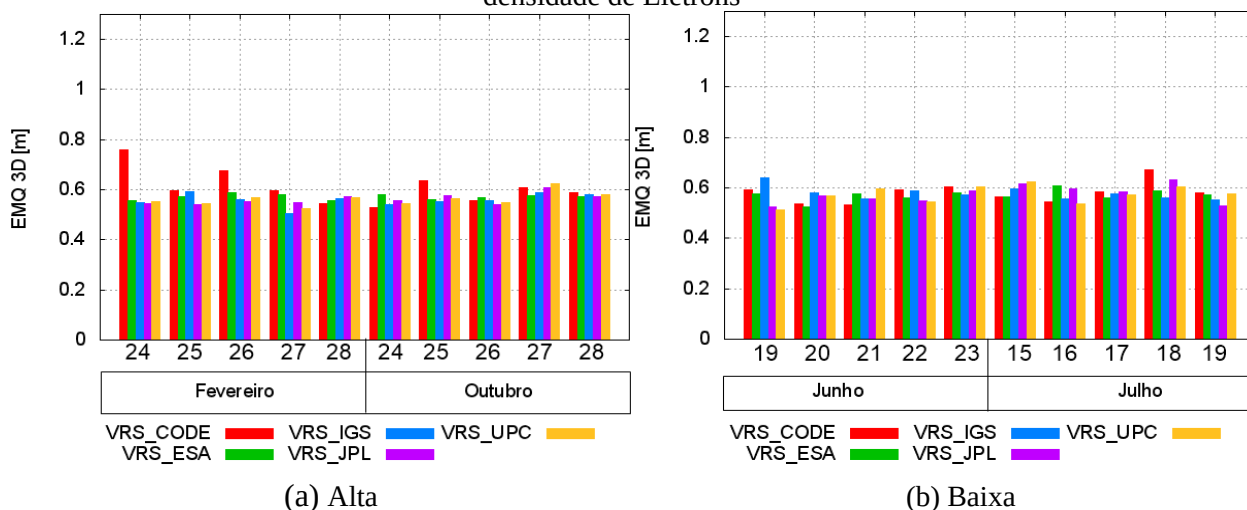


Tabela 3– EMQ 3D do PPP (em m) diário da estratégias da região Central

Alta	Dia	24/fev	25/fev	26/fev	27/fev	28/fev	24/out	25/out	26/out	27/out	28/out
	VRS_CODE	0,7608	0,5955	0,6775	0,5978	0,5465	0,5288	0,6362	0,5548	0,6098	0,5899
	VRS_ESA	0,5559	0,5716	0,5876	0,5807	0,5569	0,5799	0,5616	0,5666	0,5779	0,5732
	VRS_IGS	0,5473	0,5939	0,5625	0,5064	0,5653	0,5421	0,5540	0,5574	0,5889	0,5802
	VRS_JPL	0,5432	0,5397	0,5537	0,5474	0,5713	0,5546	0,5768	0,5401	0,6087	0,5721
	VRS_UPC	0,5545	0,5449	0,5688	0,5255	0,5694	0,5436	0,5648	0,5500	0,6224	0,5821
Baixa	Dia	19/jun	20/jun	21/jun	22/jun	23/jun	15/jul	16/jul	17/jul	18/jul	19/jul
	VRS_CODE	0,5939	0,5359	0,5338	0,5933	0,6033	0,5649	0,5457	0,5826	0,6725	0,5808
	VRS_ESA	0,5782	0,5231	0,5745	0,5613	0,5802	0,5642	0,6093	0,5601	0,5894	0,5740
	VRS_IGS	0,6406	0,5802	0,5570	0,5897	0,5722	0,5958	0,5570	0,5778	0,5605	0,5539
	VRS_JPL	0,5240	0,5667	0,5565	0,5495	0,5881	0,6164	0,5978	0,5851	0,6307	0,5301
	VRS_UPC	0,5129	0,5672	0,5977	0,5458	0,6055	0,6246	0,5381	0,5721	0,6033	0,5777

Figura 38 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Alta (a) e Baixa (b)
densidade de Elétrons

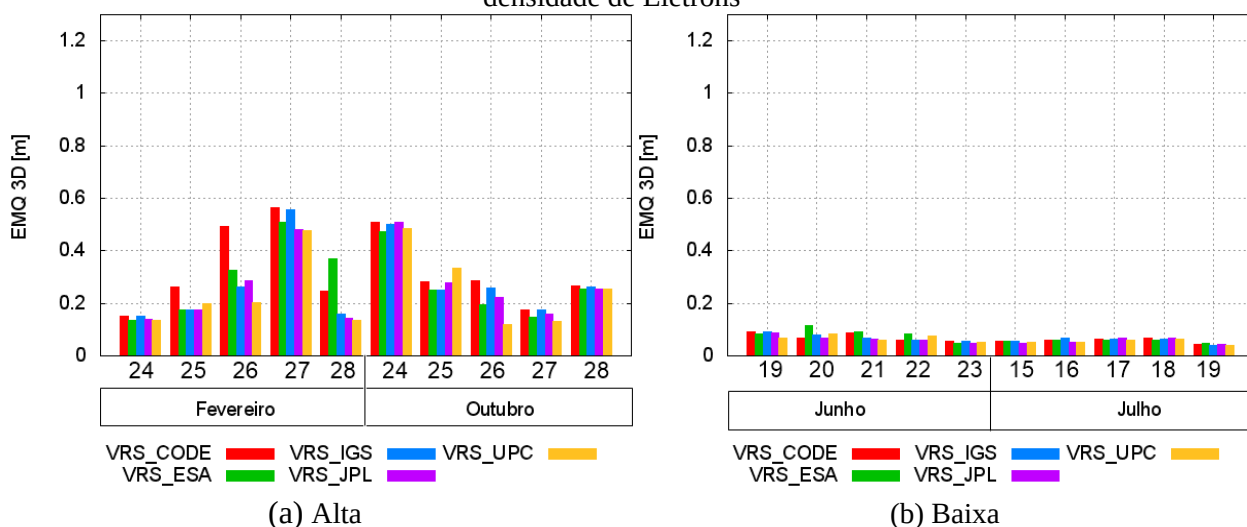


Tabela 4– EMQ 3D do PPP (em m) diário da estratégias da região Sul

Alta	Dia	24/fev	25/fev	26/fev	27/fev	28/fev	24/out	25/out	26/out	27/out	28/out
	VRS_CODE	0,1511	0,2630	0,4912	0,5626	0,2469	0,5095	0,2841	0,2843	0,1732	0,2675
	VRS_ESA	0,1368	0,1734	0,3257	0,5069	0,3707	0,4743	0,2493	0,1935	0,1475	0,2539
	VRS_IGS	0,1530	0,1763	0,2629	0,5586	0,1586	0,5022	0,2512	0,2583	0,1743	0,2614
	VRS_JPL	0,1400	0,1744	0,2844	0,4829	0,1431	0,5087	0,2794	0,2207	0,1580	0,2562
	VRS_UPC	0,1370	0,2001	0,2033	0,4775	0,1348	0,4854	0,3334	0,1207	0,1332	0,2534
Baixa	Dia	19/jun	20/jun	21/jun	22/jun	23/jun	15/jul	16/jul	17/jul	18/jul	19/jul
	VRS_CODE	0,0906	0,0670	0,0856	0,0601	0,0549	0,0556	0,0599	0,0642	0,0672	0,0435
	VRS_ESA	0,0847	0,1135	0,0917	0,0847	0,0461	0,0572	0,0602	0,0601	0,0598	0,0475
	VRS_IGS	0,0897	0,0807	0,0678	0,0612	0,0556	0,0558	0,0690	0,0620	0,0640	0,0417
	VRS_JPL	0,0879	0,0677	0,0650	0,0604	0,0492	0,0488	0,0522	0,0673	0,0657	0,0448
	VRS_UPC	0,0656	0,0837	0,0613	0,0747	0,0524	0,0500	0,0534	0,0578	0,0626	0,0408

Figura 39 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Alta (a) e Baixa (b) densidade de Elétrons

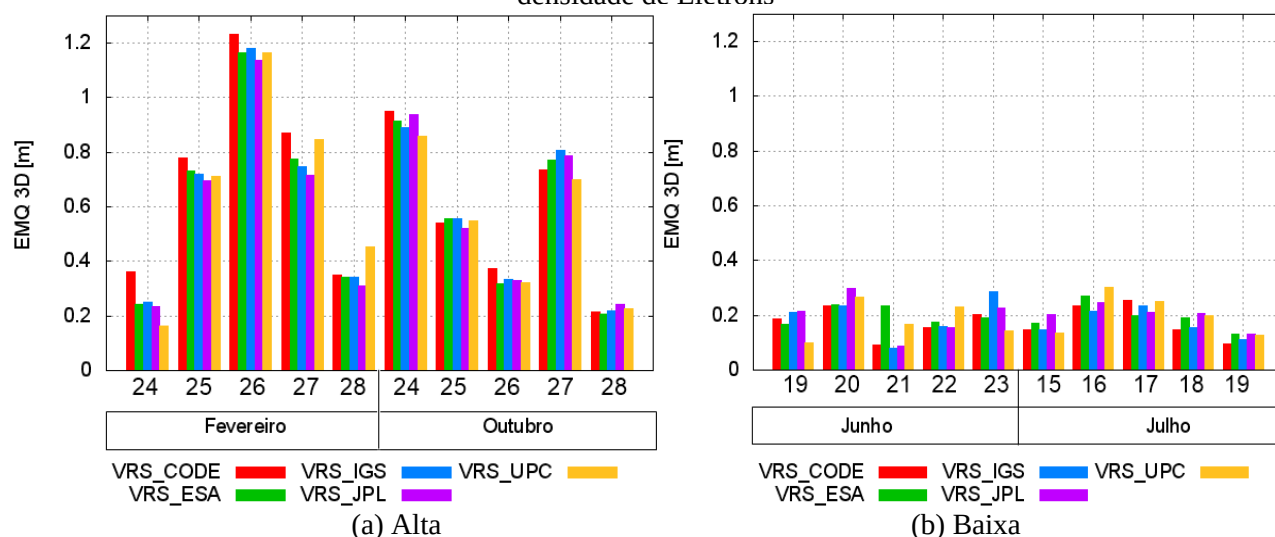


Tabela 5–EMQ 3D do PPP (em m) diário da estratégias da região Sudeste

Alta	Dia	24/fev	25/fev	26/fev	27/fev	28/fev	24/out	25/out	26/out	27/out	28/out
	VRS_CODE	0,3631	0,7791	1,2337	0,8715	0,3514	0,9505	0,5416	0,3757	0,7351	0,2149
	VRS_ESA	0,2437	0,7314	1,1636	0,7768	0,3407	0,9160	0,5584	0,3185	0,7705	0,2063
	VRS_IGS	0,2487	0,7207	1,1792	0,7490	0,3434	0,8886	0,5549	0,3330	0,8060	0,2185
	VRS_JPL	0,2362	0,6977	1,1369	0,7164	0,3117	0,9389	0,5210	0,3305	0,7884	0,2444
	VRS_UPC	0,1626	0,7128	1,1655	0,8471	0,4539	0,8591	0,5485	0,3216	0,6983	0,2269
Baixa	Dia	19/jun	20/jun	21/jun	22/jun	23/jun	15/jul	16/jul	17/jul	18/jul	19/jul
	VRS_CODE	0,1867	0,2343	0,0918	0,1535	0,2016	0,1458	0,2350	0,2550	0,1490	0,0935
	VRS_ESA	0,1669	0,2387	0,2335	0,1767	0,1925	0,1691	0,2690	0,1995	0,1895	0,1304
	VRS_IGS	0,2091	0,2362	0,0793	0,1587	0,2845	0,1484	0,2145	0,2356	0,1566	0,1126
	VRS_JPL	0,2164	0,2963	0,0875	0,1537	0,2258	0,2023	0,2454	0,2097	0,2078	0,1309
	VRS_UPC	0,0994	0,2665	0,1661	0,2307	0,1424	0,1344	0,3012	0,2521	0,1988	0,1260

Vale ressaltar que os resultados apresentados anteriormente são concernentes ao EMQ 3D. Em relação a comparação do uso dos diferentes IONEX, com base nos dados apresentados graficamente nas Figura 35– Figura 39, e numericamente nas Tabela 1 a Tabela 5, pode-se verificar que os mapas ionosféricos não apresentam um padrão, quanto ao emprego de um único e melhor IONEX, que satisfaça todas as regiões brasileiras. Além disso, é importante destacar que a diferença dos resultados empregando os IONEXs em período de baixa atividade ionosférica são em grande parte inferiores a 5 cm.

No entanto, com base nos resultados dos dias de estudo, considerando principalmente o período de alta densidade de elétrons, pode-se concluir que os melhores mapas ionosféricos a serem utilizados na região sul são os fornecidos pelo centro de análise UPC. No que concerne a região Sudeste, o melhor modelo adotado seria o JPL. Esta conclusão, bem como outras análises podem ser encontradas no artigo publicado no CBC (Congresso Brasileiro de Cartografia), intitulado “Análise do Desempenho dos Mapas Ionosféricos no Posicionamento Baseado em Redes” (ORTEGA, ALVES e AGUIAR, 2014). No entanto, para as regiões norte, bem como para o nordeste o melhor modelo para correção ionosférica é o fornecido pelo ESA, já para a região Central é o JPL. Por outro lado, o mapa do CODE foi o que apresentou os piores resultados, conforme são apresentados em vermelho nas Tabela 1 a Tabela 5.

Note que a média do erro associado a alta densidade de elétrons é maior que os meses de baixa, exceto para a região Central (Figura 37), evidenciando o efeito sazonal da ionosfera no posicionamento. Deste modo, pode-se notar (Figura 39) que o erro referente ao posicionamento em período de alta atividade solar na região Sudeste é em torno de 2 à 3 vezes maior, porém em alguns casos este erro pode ser quatro ou até seis vezes maior que no período de baixa densidade de elétrons. Do mesmo modo, a região Sul (Figura 38) apresenta uma variação de 2 à 5 vezes. No que concerne a região Nordeste (Figura 35) e a Norte (Figura 36), o erro referente a alta densidade é em torno de 2 vezes maior.

No entanto, no que concerne a VRS gerada na região Norte, Nordeste e Central, o erro não apresentou mudanças significativas quanto a variação sazonal, isso ocorreu, possivelmente, porque as primeiras regiões (Nordeste e Norte) estão espacialmente relacionadas com a elevação dos elétrons para as altas altitudes devido o efeito fonte, ou seja, próximo a linha do equador geomagnético. Por outro lado, mais estudos e investigações a respeito desta região devem ser realizados, pois embora não apresente variação sazonal, como as outras regiões

(Nordeste e Norte), a região central apresentou um erro médio maior, em torno de 57 cm (Figura 33 e Tabela 3). Este valor representa quase o dobro em relação ao erro obtido na região norte em período de alta atividade ionosférica, e ainda é de 3 a 4 vezes maior do que o erro médio nas outras regiões no período de baixa atividade, o erro associado a região Central. Este valor de EMQ 3D elevado pode estar relacionado com alguma particularidade ionosférica, como a formação das bolhas de plasma, ou outro erro característico da região, ou ainda provindos da estação base TOPL, como a qualidade dos dados, bem como, ao mal funcionamento dos modelos para esta região.

Outro ponto a ser destacado, é a influência espacial evidenciada no período de alta atividade ionosférica (Gráfico (a) das Figura 35 – Figura 39), Fevereiro e Outubro, pois nestes meses a região sudeste apresenta o triplo do EMQ se comparada com as regiões Sul, Norte e Nordeste. Isto se justifica, pelo fato da região sudeste estar localizada na região equatorial, onde normalmente ocorre o pico do efeito da anomalia equatorial ($\approx$ latitude geomagnética 22°) e irregularidades ionosféricas, aumentando o efeito eletrojato da ionosfera.

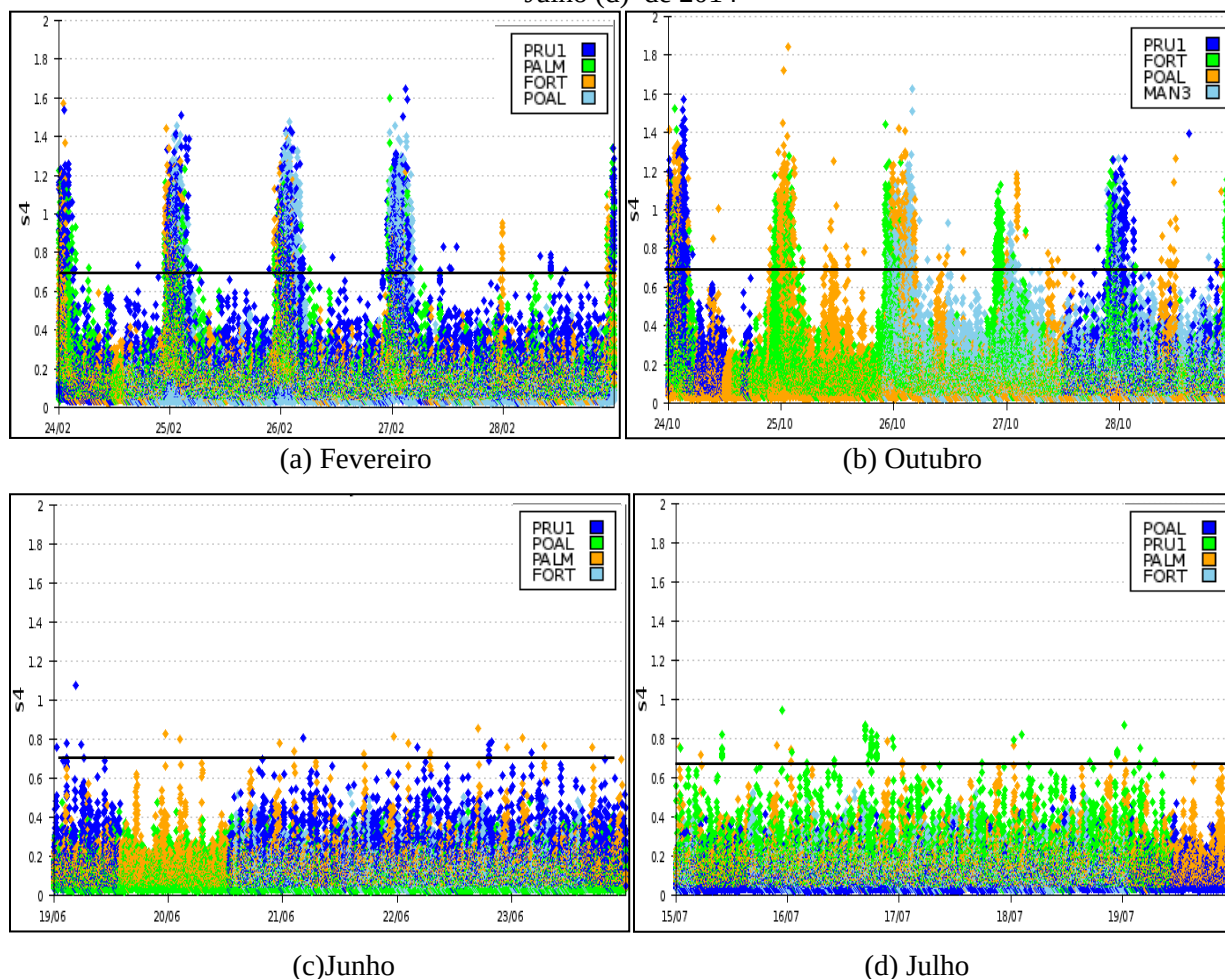
Ao considerar os dias com maior quantidade de manchas solares, dias 57 e 58 (dias 26 e 27 de fevereiro – Figura 29) de 2014, destaca-se a região Sudeste e Sul, pois resulta em EMQ 3D de até 5 vezes (Sudeste) e 3 vezes (Sul) maior que a região Norte e Nordeste. Deste modo, nota-se a influência das manchas solares no valor do TEC, e consequentemente no erro ionosférico, prejudicando assim a qualidade do posicionamento. Como se pode observar, nestes dias, o EMQ na região sudeste alcançou a precisão métrica.

Além disso, é importante destacar, conforme já citado, que embora o período de estudo referente a outubro não apresentou nenhuma tempestade geomagnética e quantidade de manchas solares expressivas em relação aos outros meses, como foi o caso do período de fevereiro (Figura 29), o mesmo apresentou valores maiores que fevereiro, como pode ser verificado principalmente na região Norte. Tal fato pode ser justificado devido a intensa atividade ionosférica e fluxo de ionização, associada aos meses de equinócio de primavera. Na região sudeste, por sua vez, nos dias 24 e 27 de Outubro, os valores do EMQ 3D são tão expressivos que superam os dias associados a quantidade de manchas solares máximas de 2014 (dias 26 e 27 de fevereiro), atingindo um erro em torno de 90 e 75cm, respectivamente.

Este fato pode estar também relacionado com a cintilação ionosférica. Deste modo, para fim de comparação e análise, a Figura 40 apresenta o gráfico referente aos dados do

índice S4 para estações nas proximidades das estações base. Como pode ser observado, estes dias apresentaram cintilação forte ($S4 \geq 0,7$), o que pode influenciar o resultado do PPP.

Figura 40 – Índice de Cintilação S4 no período de Fevereiro (a), Outubro(b), Junho (c) e Julho (d) de 2014



Fonte: <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/view/View.php#>>. Acesso em 26/07/2015

As Figura 41 a Figura 45 apresentam os resultados do EMQ 3D do PPP no modo cinemático época por época, dos dias que apresentaram o maior EMQ, dias 24, 26 e 27 de Fevereiro para região Norte, Sudeste e Sul, e os dias 24 e 27 de Outubro para regiões Nordeste e Central, respectivamente. Do mesmo modo, os dias 19 de julho para as regiões Nordeste, Sudeste e Sul, bem como os dias 17 de julho e 20 de junho, para as regiões Norte e Central, foram os dias que apresentaram a melhor qualidade, ou seja, menor erro posicional, respectivamente.

Figura 41 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta-24/10/14 (a) e baixa-19/07/2014 (b) atividade ionosférica de 2014 para região Nordeste

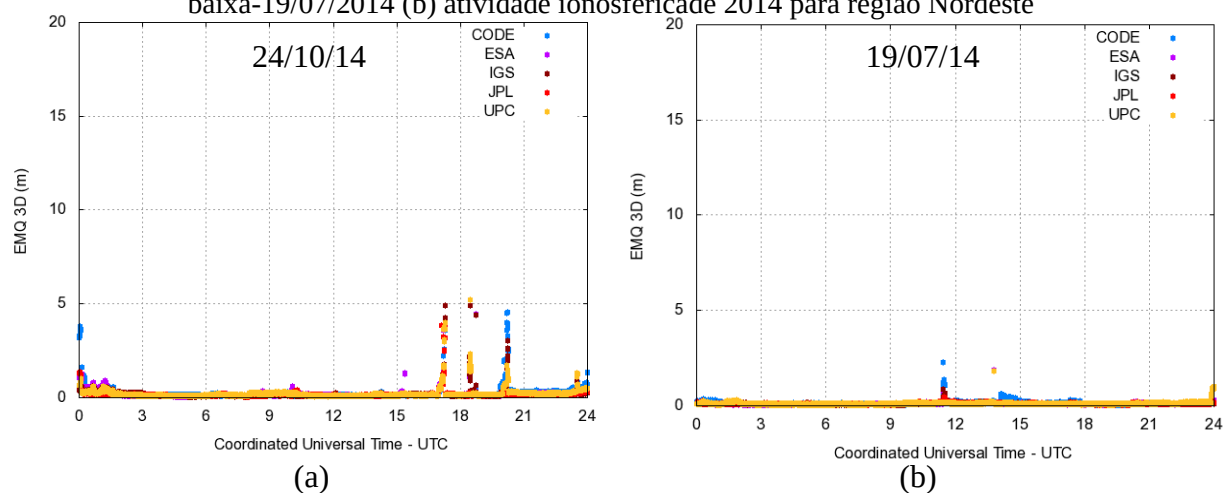


Figura 42 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta - 24/02/14 (a) e baixa- 17/07/14 (b) atividade ionosférica de 2014 para região Norte

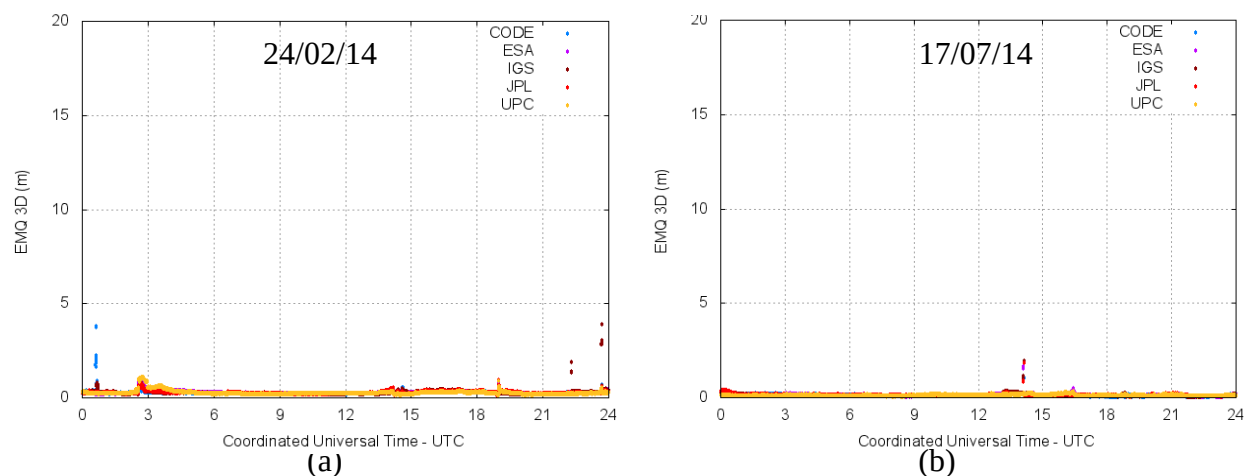


Figura 43 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta - 27/02/14 (a) e baixa - 19/07/14 (b) atividade ionosférica de 2014 para região Sul

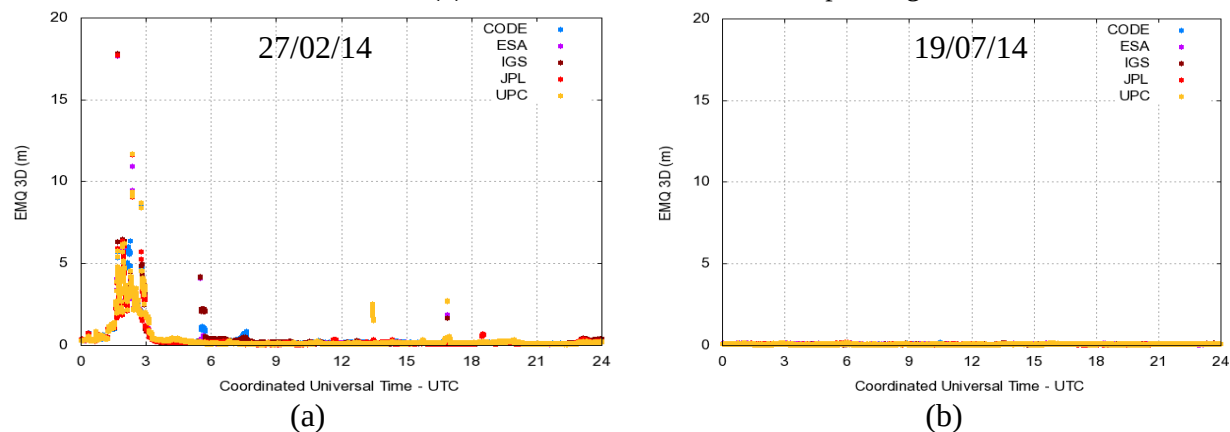


Figura 44 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta - 26/02/14 (a) e baixa - 19/07/14 (b) atividade ionosférica de 2014 para região Sudeste

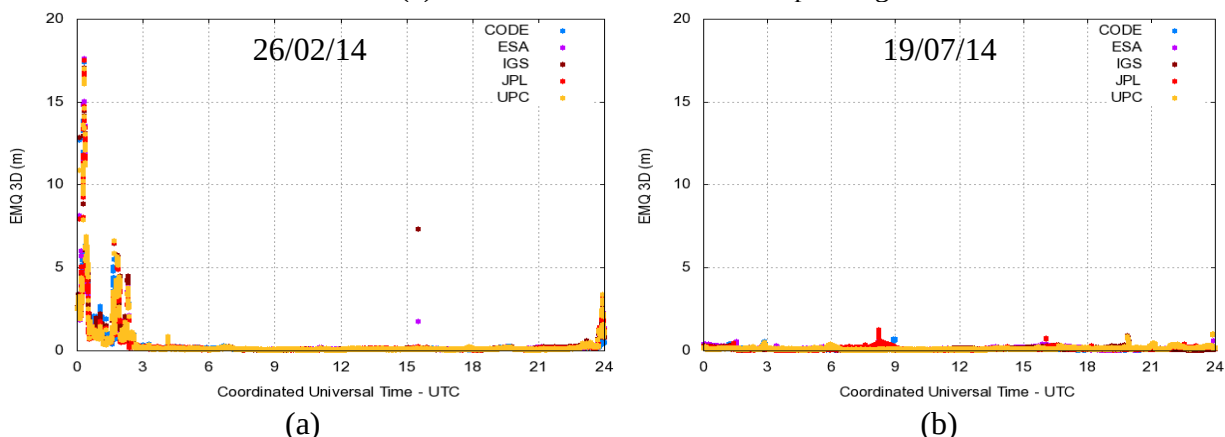
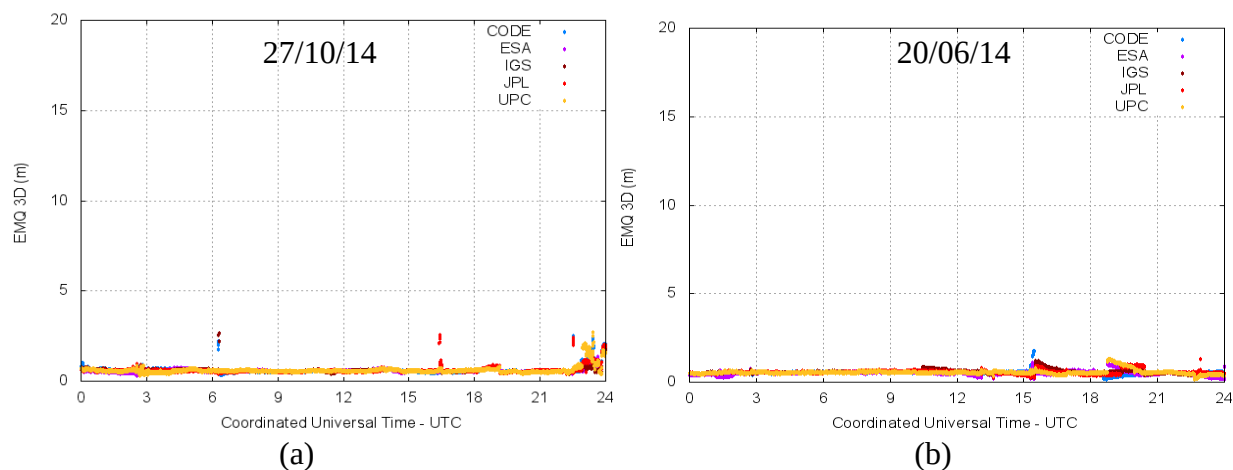


Figura 45 – EMQ 3D do PPP época por época no modo Cinemático para o dia de alta - 27/10/14 (a) e baixa - 20/06/14 (b) atividade ionosférica de 2014 para região Central



Deste modo, é possível avaliar o efeito sazonal, bem como a variabilidade espacial diária do TEC. Nota-se nitidamente nas Figura 41 a Figura 45 a influência das irregularidades ionosféricas, que resulta na degradação da qualidade do posicionamento, chegando aproximadamente 18 m, entre as 0 – 5 UTC, principalmente para as regiões sul e sudeste. Por outro lado, esta influência não é notada em período de baixa atividade ionosférica (b), considerando o mesmo intervalo de tempo (0 – 5 UTC). Além disso, pode-se observar em (a) a influência do TEC, onde seu efeito máximo ocorre próximo às 17–21 UTC.

Em relação a comparação do uso dos diferentes IONEX, uma análise foi realizada considerando a estratégia que utiliza o IONEX do IGS como referência. A Tabela 6 apresenta a discrepância (%) entre o EMQ de referência (VRS_IGS) e o EMQ das demais

estratégias. Assim, os valores positivos referem-se as porcentagens que estão acima do valor de referência, ou seja, apresentam acurácia melhor que a VRS_IGS. De forma análoga, os valores negativos apresentam acurácia inferior ao VRS_IGS. Esta análise foi considerada apenas para os dias de alta densidade de elétrons.

Deste modo, considerando os melhores modelos para correção ionosférica de cada região descrito anteriormente, há uma melhora máxima de 53,27%, 9,22%, 12,69%, 59,71% e 9,13% em relação ao resultado utilizando o modelo do IGS para as regiões Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Central, conforme apresentado na Tabela 6. Do mesmo modo, nota-se que o modelo do CODE atingiu o maior EMQ 3D, apresentando uma discrepância cerca de 109,08% maior que o IGS.

Tabela 6– Percentagem de Melhora (ou piora) na Acurácia do PPP em relação ao IGS

Região	Dia do Ano	VRS_CODE (%)	VRS_ESA (%)	VRS_JPL (%)	VRS_UPC (%)
Sul	24/02/2014	1,25	10,60	8,51	10,43
	25/02/2014	-49,19	1,64	1,06	-13,52
	26/02/2014	-86,84	-23,90	-8,19	22,76
	27/02/2014	-0,73	9,24	13,54	14,52
	28/02/2014	-55,70	-133,74	9,76	14,98
	24/10/2014	-1,46	5,55	-1,30	3,34
	24/10/2014	-13,09	0,75	-11,22	-32,69
	24/10/2014	-10,09	25,10	14,56	53,27
	24/10/2014	0,63	15,38	9,36	23,59
	24/10/2014	-2,33	2,88	1,99	3,06
Sudeste	24/02/2014	-45,99	2,01	5,05	34,63
	25/02/2014	-8,10	-1,48	3,20	1,09
	26/02/2014	-4,62	1,32	3,58	1,16
	27/02/2014	-16,35	-3,72	4,35	-13,10
	28/02/2014	-2,33	0,78	9,22	-32,18
	24/10/2014	-6,96	-3,07	-5,65	3,32
	24/10/2014	2,40	-0,64	6,10	1,15
	24/10/2014	-12,80	4,37	0,76	3,43
	24/10/2014	8,80	4,41	2,18	13,36
	24/10/2014	1,64	5,56	-11,86	-3,83
Norte	24/02/2014	0,67	1,42	-6,24	1,93
	25/02/2014	-30,67	-6,01	8,98	-14,04
	26/02/2014	-16,73	0,24	-12,73	-25,68
	27/02/2014	-42,82	12,69	-4,20	4,02
	28/02/2014	-6,92	-2,92	-8,13	-15,24
	24/10/2014	1,40	-8,95	-1,72	-7,42
	24/10/2014	-3,51	6,50	6,86	7,68
	24/10/2014	-1,90	1,87	-0,24	7,18
	24/10/2014	-6,69	3,21	3,46	3,06
	24/10/2014	8,56	10,63	5,28	6,75

Nordeste	24/02/2014	-26,9	11,52	-1,17	-11,43
	25/02/2014	-12,01	28,25	17,93	16,16
	26/02/2014	-79,24	-17,63	5,67	-18,25
	27/02/2014	-109,08	0,89	3,80	-15,02
	28/02/2014	-28,90	22,48	14,07	-49,22
	24/10/2014	-6,10	59,71	40,72	62,91
	24/10/2014	-8,42	28,62	16,93	1,14
	24/10/2014	3,18	51,01	25,44	42,61
	24/10/2014	-35,90	34,56	22,64	19,09
	24/10/2014	-14,01	35,97	30,51	28,88
Central	24/02/2014	-39,01	-1,56	0,76	-1,32
	25/02/2014	-0,27	3,77	9,13	8,26
	26/02/2014	-20,43	-4,45	1,56	-1,11
	27/02/2014	-18,04	-14,67	-8,09	-3,77
	28/02/2014	3,34	1,49	-1,06	-0,72
	24/10/2014	2,45	-6,98	-2,31	-0,29
	24/10/2014	-14,82	-1,37	-4,11	-1,95
	24/10/2014	0,47	-1,65	3,10	1,33
	24/10/2014	-3,55	1,87	-3,37	-5,70
	24/10/2014	-1,66	1,21	1,40	-0,32

Deste modo, pode-se concluir, com os experimentos realizados, que não há um único modelo fornecido pelos centros de análise do IGS que melhor se enquadra a realidade brasileira, nota-se que o resultado depende das condições ionosféricas e principalmente da localização da estação, sendo assim, os resultados não apontam um modelo específico. Portanto, mais investigações utilizando processamento estático, bem como, o emprego de receptores de simples frequência podem ser realizados para verificar se há algum padrão.

4.2 Análise dos modelos empregados no posicionamento baseado em redes – Modelo de estimativa do TEC, Mapas Ionosféricos e o modelo de Grade

Nessa seção, são apresentados os resultados e análises da comparação entre os três modelos de mitigação ionosférica em estudo, descritos nas seções 3.2.2.1. e 3.2.2.2.

4.2.1 Análise do modelo de estimativa do TEC, Mapas Globais Ionosféricos e o modelo de Grade no posicionamento em Redes

Nessa seção, são apresentados os resultados e análises da comparação entre os três modelos de mitigação ionosférica em estudo, descritos na seção 3.2.2.1., sendo eles Estimativa do TEC (VRS_ETEC), Modelo de Grade Ionosférica (VRS_GRADE), e Mapa Ionosférico Global (VRS_GLOBAL). Vale ressaltar, como descrito na seção anterior, não há um padrão quanto ao emprego de um único mapa no território brasileiro, assim, foi adotado o Mapa

Global do IGS (VRS_IGS), tendo em vista que o mesmo apresentou boa performance, e é gerado em função da combinação dos demais mapas globais estudados. A Figura 46 (a) a Figura 55 (a) e Tabela 7 a Tabela 16 apresentam o EMQ3D obtido a partir dos dados das VRSs geradas com os modelos que foram validados no PPP no modo cinemático, da região norte, nordeste, central, sul e sudeste, respectivamente, bem como a discrepância concernente a estratégia VRS_IGS. Vale destacar, que os valores apresentados em negrito nas tabelas a seguir, são os que representam a melhor estratégia diária, considerando o EMQ3D. Por outro lado, da Figura 46 (b) até a Figura 55(b) são apresentadas as porcentagens de melhoria em relação a estratégia VRS_IGS, sendo que os valores positivos referem-se as porcentagens que estão acima do valor concernente ao processamento utilizando o arquivo do IGS, ou seja, apresentam acurácia melhor que a estratégia utilizando o modelo global, e os valores negativos apresentam acurácia inferior.

Figura 46 – EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Nordeste para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhoria em relação a estratégia VRS_IGS (b)

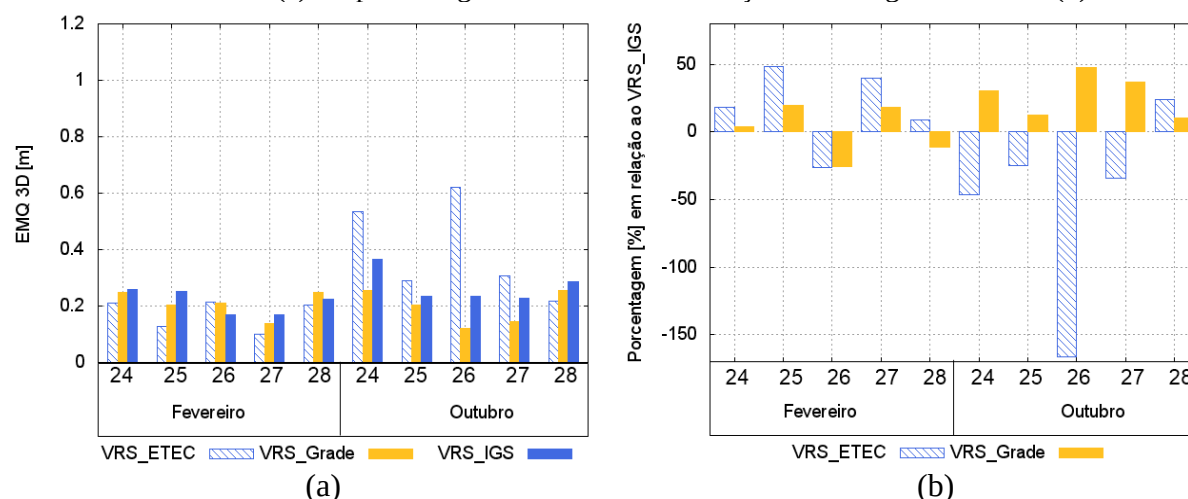


Tabela 7–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Nordeste para período de Alta densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
24/fev	0,2120	0,2496	0,2593	4,7315	0,9733
25/fev	0,1289	0,2018	0,2511	12,2199	4,9292
26/fev	0,2121	0,2112	0,1682	- 4,3882	- 4,3014
27/fev	0,1017	0,1376	0,1686	6,6906	3,1016
28/fev	0,2048	0,2493	0,2244	1,9527	- 2,4978
24/out	0,5336	0,2540	0,3643	- 16,9357	11,0320
25/out	0,2902	0,2044	0,2331	- 5,7181	2,8685
26/out	0,6198	0,1223	0,2328	- 38,6986	11,0544
27/out	0,3073	0,1449	0,2287	- 7,8639	8,3771
28/out	0,2175	0,2562	0,2853	6,7796	2,9051

Figura 47– EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Nordeste para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

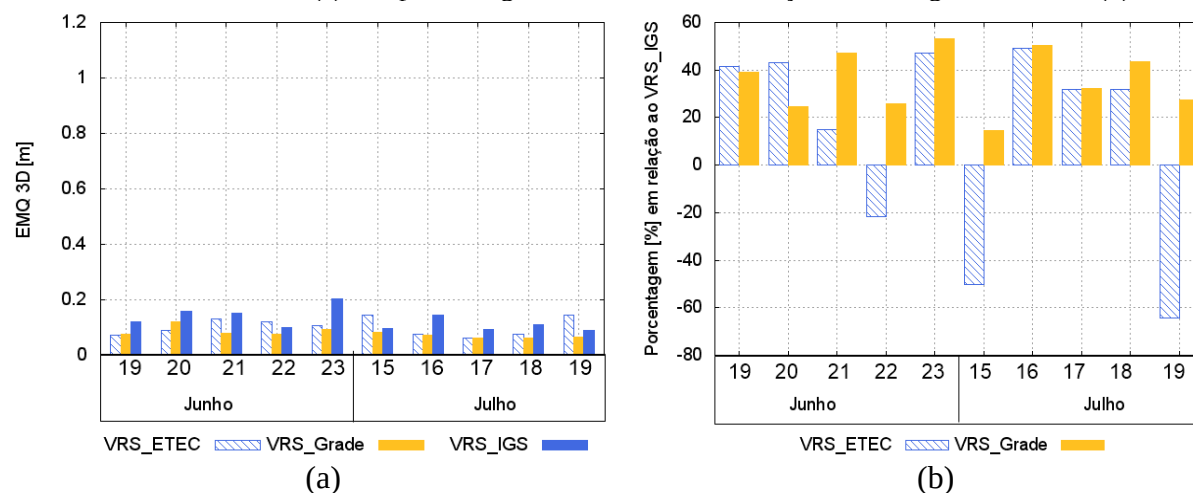


Tabela 8–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Nordeste para período de Baixa densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
19/jun	0,0711	0,0744	0,1217	5,0613	4,7340
20/jun	0,0907	0,1203	0,1594	6,8747	3,9182
21/jun	0,1293	0,0803	0,1523	2,2910	7,1994
22/jun	0,1223	0,0748	0,1007	- 2,1623	2,5897
23/jun	0,1072	0,0948	0,2026	9,5456	10,7834
15/jul	0,1437	0,0817	0,0958	- 4,7967	1,4101
16/jul	0,0743	0,0728	0,1464	7,2124	7,3655
17/jul	0,0638	0,0634	0,0937	2,9926	3,0328
18/jul	0,0754	0,0626	0,1107	3,5239	4,8090
19/jul	0,1448	0,0640	0,0882	- 5,6670	2,4185

Figura 48–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

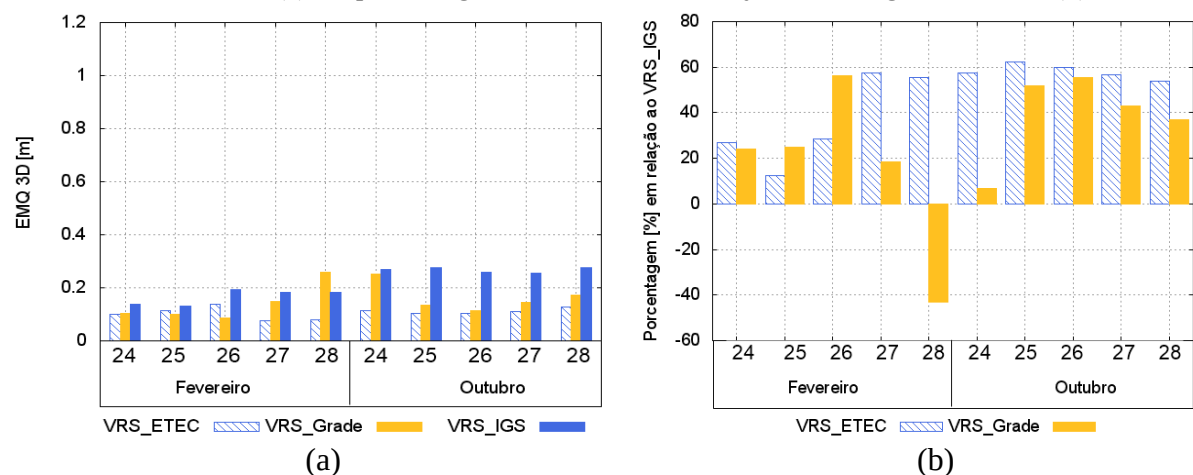


Tabela 9–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Alta densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
24/fev	0,0999	0,1040	0,1369	3,7025	3,2885
25/fev	0,1152	0,0988	0,1314	1,6208	3,2551
26/fev	0,1387	0,0851	0,1938	5,5157	10,8701
27/fev	0,0771	0,1479	0,1816	10,4465	3,3648
28/fev	0,0806	0,2589	0,1811	10,0511	– 7,7835
24/out	0,1148	0,2512	0,2694	15,4546	1,8218
25/out	0,1037	0,1335	0,2762	17,2566	14,2717
26/out	0,1036	0,1142	0,2574	15,3745	14,3189
27/out	0,1107	0,1463	0,2561	14,5444	10,9841
28/out	0,1272	0,1738	0,2759	14,8768	10,2152

Figura 49– EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

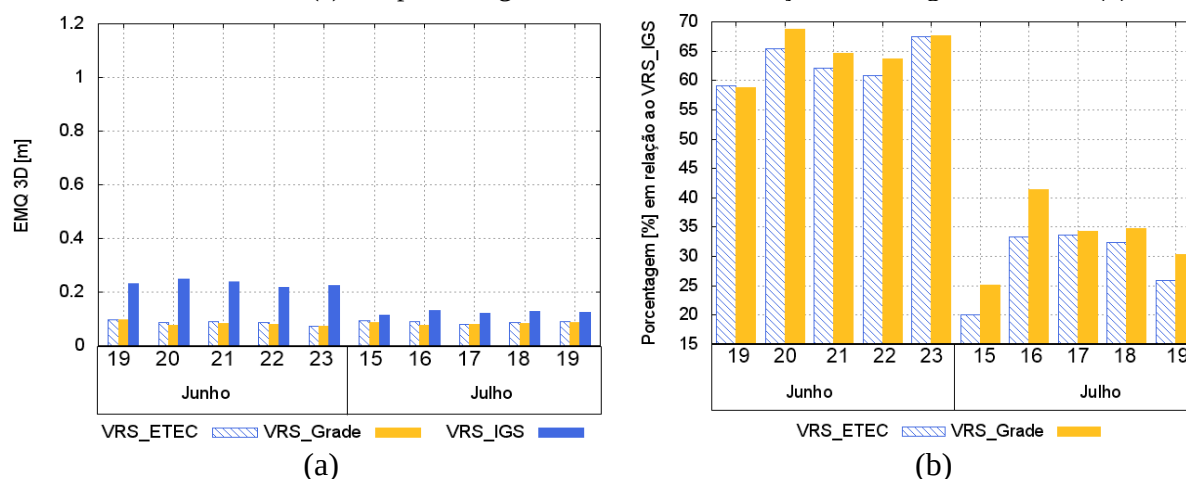


Tabela 10–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Norte para período de Baixa densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
19/jun	0,0951	0,0958	0,2327	13,7521	13,6827
20/jun	0,0855	0,0773	0,2477	16,2174	17,0352
21/jun	0,0904	0,0841	0,2381	14,7752	15,4022
22/jun	0,0851	0,0791	0,2174	13,2364	13,8371
23/jun	0,0734	0,0729	0,2255	15,2076	15,2590
15/jul	0,0918	0,0859	0,1148	2,2942	2,8873
16/jul	0,0881	0,0773	0,1320	4,3922	5,4711
17/jul	0,0809	0,0801	0,1218	4,0938	4,1740
18/jul	0,0855	0,0826	0,1265	4,1038	4,3916
19/jul	0,0909	0,0855	0,1226	3,1729	3,7123

Figura 50–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

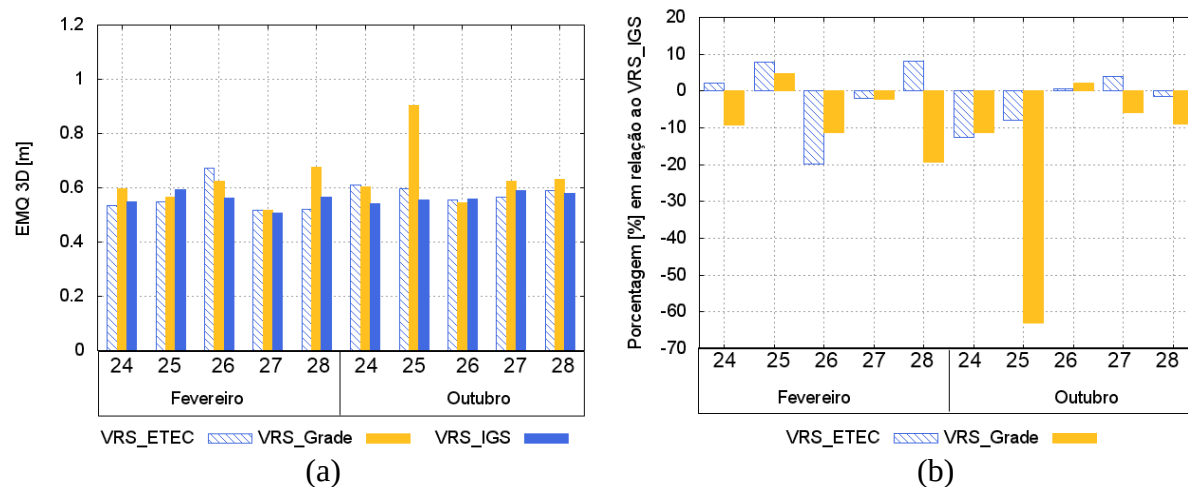


Tabela 11–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Alta densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
24/fev	0,5353	0,5975	0,5473	1,2009	- 5,0121
25/fev	0,5472	0,5664	0,5939	4,6692	2,7508
26/fev	0,6735	0,6257	0,5625	- 11,0998	- 6,3194
27/fev	0,5169	0,5179	0,5064	- 1,0508	- 1,1433
28/fev	0,5194	0,6749	0,5653	4,5891	- 10,9571
24/out	0,6097	0,6026	0,5421	- 6,7650	- 6,0515
25/out	0,5982	0,9033	0,5540	- 4,4139	- 34,9287
26/out	0,5539	0,5461	0,5574	0,3411	1,1293
27/out	0,5660	0,6229	0,5889	2,2843	- 3,3997
28/out	0,5881	0,6320	0,5802	- 0,7908	- 5,1791

Figura 51– EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

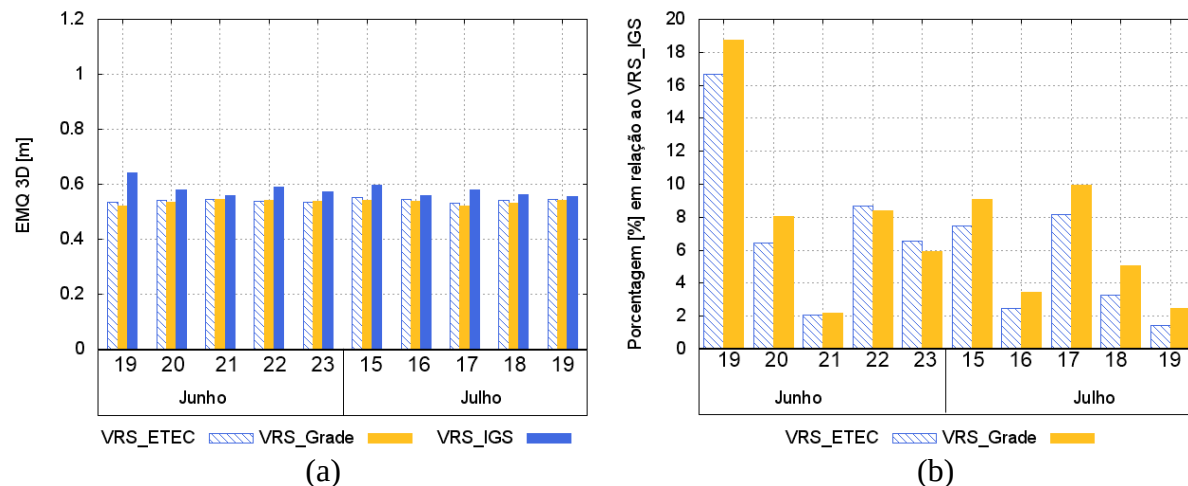


Tabela 12–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Central para período de Baixa densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
19/jun	0,5339	0,5208	0,6406	10,6652	11,9846
20/jun	0,5429	0,5335	0,5802	3,7246	4,6729
21/jun	0,5454	0,5450	0,5570	1,1606	1,2072
22/jun	0,5384	0,5402	0,5897	5,1327	4,9505
23/jun	0,5348	0,5383	0,5722	3,7465	3,3912
15/jul	0,5515	0,5416	0,5958	4,4358	5,4261
16/jul	0,5433	0,5377	0,5570	1,3701	1,9291
17/jul	0,5307	0,5203	0,5778	4,7088	5,7507
18/jul	0,5421	0,5320	0,5605	1,8432	2,8488
19/jul	0,5461	0,5401	0,5539	0,7810	1,3771

Figura 52–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

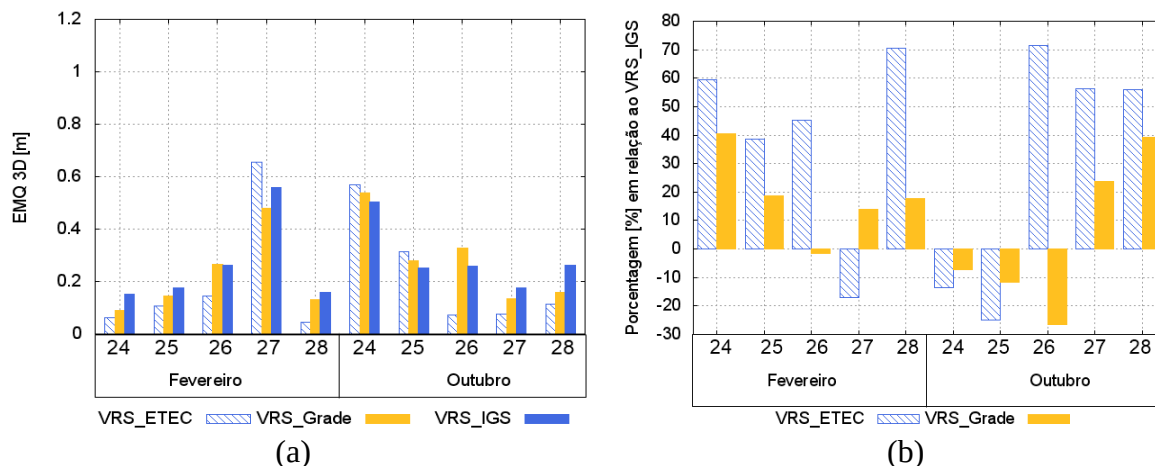


Tabela 13–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Alta densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
24/fev	0,0622	0,0910	0,1530	9,0838	6,1991
25/fev	0,1080	0,1432	0,1763	6,8269	3,3115
26/fev	0,1440	0,2672	0,2629	11,8926	-0,4286
27/fev	0,6546	0,4808	0,5586	-9,6014	7,7769
28/fev	0,0465	0,1302	0,1586	11,2053	2,8344
24/out	0,5698	0,5393	0,5022	-6,7601	-3,7113
25/out	0,3137	0,2804	0,2512	-6,2454	-2,9153
26/out	0,0734	0,3271	0,2583	18,4840	-6,8788
27/out	0,0764	0,1330	0,1743	9,7892	4,1252
28/out	0,1153	0,1588	0,2614	14,6140	10,2594

Figura 53– EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

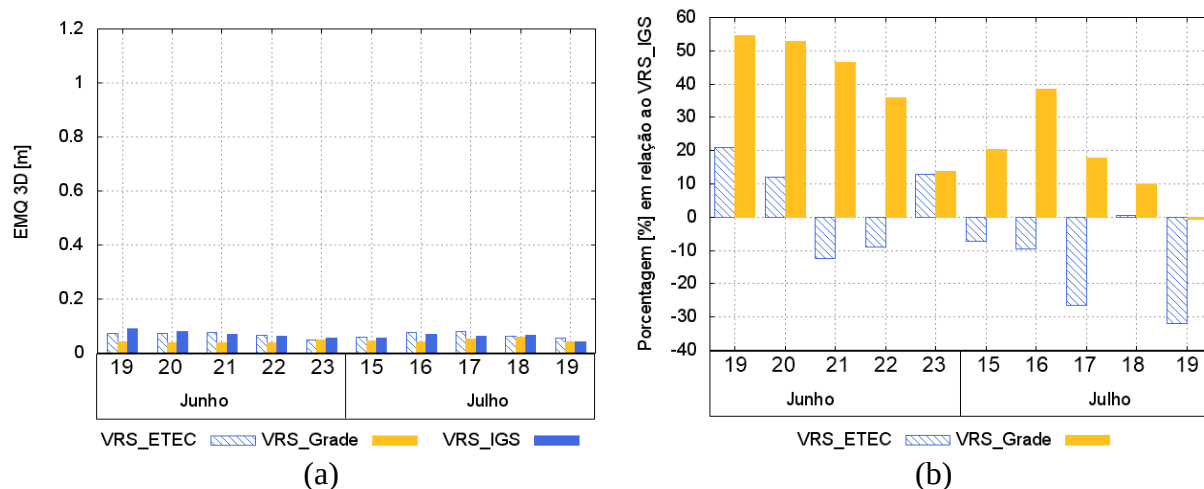


Tabela 14–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sul para período de Baixa densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
19/jun	0,0709	0,0409	0,0897	1,8754	4,8795
20/jun	0,0710	0,0380	0,0807	0,9674	4,2648
21/jun	0,0762	0,0364	0,0678	-0,8371	3,1469
22/jun	0,0667	0,0393	0,0612	-0,5534	2,1897
23/jun	0,0484	0,0479	0,0556	0,7138	0,7653
15/jul	0,0598	0,0444	0,0558	-0,4063	1,1376
16/jul	0,0756	0,0424	0,0690	-0,6677	2,6532
17/jul	0,0785	0,0510	0,0620	-1,6497	1,1028
18/jul	0,0636	0,0575	0,0640	0,0393	0,6479
19/jul	0,0550	0,0420	0,0417	-1,3330	-0,0276

Figura 54–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Alta densidade de Elétrons (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b)

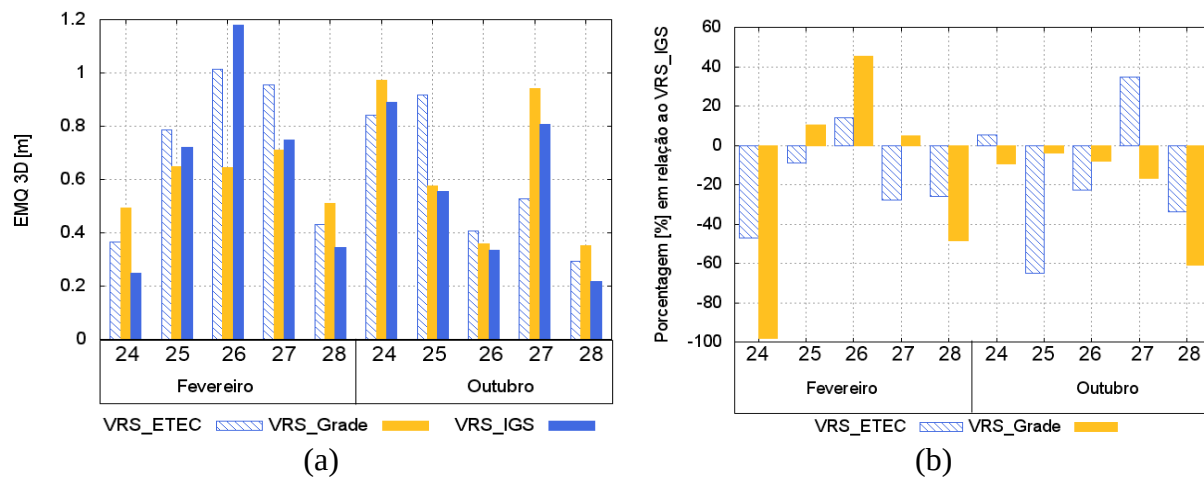


Tabela 15–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Alta densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
24/fev	0,3661	0,4927	0,2487	– 11,7318	– 24,4003
25/fev	0,7846	0,6471	0,7207	– 6,3867	7,3599
26/fev	1,0139	0,6434	1,1792	16,5251	53,5812
27/fev	0,9558	0,7118	0,7490	– 20,6845	3,7116
28/fev	0,4319	0,5097	0,3434	– 8,8491	– 16,6329
24/out	0,8431	0,9740	0,8886	4,5541	– 8,5379
25/out	0,9170	0,5771	0,5549	– 36,2094	– 2,2266
26/out	0,4083	0,3593	0,3330	– 7,5305	– 2,6265
27/out	0,5269	0,9416	0,8060	27,9154	– 13,5621
28/out	0,2923	0,3521	0,2185	– 7,3835	– 13,3564

Figura 55– EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Baixa densidade de Elétrons índice (a) e a porcentagem de melhoria em relação a estratégia VRS_IGS (b)

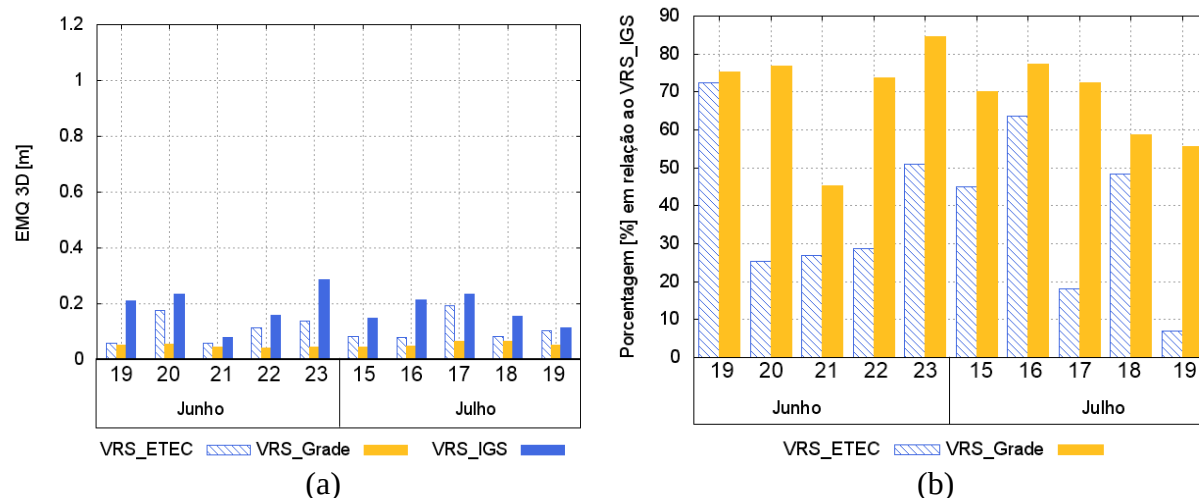


Tabela 16–EMQ 3D do PPP (em m) diário da região Sudeste para período de Baixa densidade de Elétrons e a Discrepância (em cm) em relação ao IGS

Dia	EMQ 3D (m)			Discrepância (cm)	
	VRS_ETEC	VRS_GRADE	VRS_IGS	VRS_ETEC	VRS_GRADE
19/jun	0,0576	0,0517	0,2091	15,1511	15,7441
20/jun	0,1761	0,0545	0,2362	6,0033	18,1632
21/jun	0,0580	0,0434	0,0793	2,1320	3,5974
22/jun	0,1132	0,0418	0,1587	4,5471	11,6878
23/jun	0,1396	0,0440	0,2845	14,4996	24,0565
15/jul	0,0816	0,0443	0,1484	6,6799	10,4087
16/jul	0,0779	0,0484	0,2145	13,6634	16,6060
17/jul	0,1931	0,0647	0,2356	4,2506	17,0896
18/jul	0,0811	0,0646	0,1566	7,5546	9,2063
19/jul	0,1047	0,0501	0,1126	0,7945	6,2547

Como pode ser observado na Figura 46 a Figura 55, juntamente com a Tabela 7 a Tabela 16 apresentadas, bem como análises anteriormente discutidas (seção 4.1) há uma forte influência no posicionamento sob condições ionosféricas intensas e com irregularidades fortes (Figura 40). De modo geral nestes períodos, principalmente referente aos dias de alta densidade de elétrons e com cintilação forte, as estratégias VRS_GRADE e VRS_ETEC apresentaram os melhores resultados, haja visto que a primeira utiliza um IONEX com melhor resolução espacial e temporal, e gerados a partir de estações nacionais, já a segunda, utiliza dados de uma sub rede de estações de referência mais próximas (Figura 30) para estimar o erro ionosférico da VRS.

Deste modo, considerando este período de intensa densidade eletrônica na região Nordeste (Figura 46 e Tabela 7) a discrepância máxima é de 12,21cm (melhora de 48,67%) e 11,05cm (melhora de 47,48%) em relação ao IGS, utilizando respectivamente o modelo de estimativa do TEC e de Grade. Do mesmo modo, a discrepância máxima da região Norte (Figura 48 e Tabela 9) é na ordem de 17,26cm (melhora de 62,47%) e 14,31cm (melhora de 55,64%), já a região Central (Figura 50 e Tabela 11) é de 4,67cm (7,86%) e 2,75 cm (4,63%). No que concerne a região Sul (Figura 52 e Tabela 13) há uma melhora significativa de 18,48cm (melhora de 71,56%) e 10,26 cm (melhora de 39,24%), bem como, uma discrepância de 27,91cm (34,63%) e 53,58cm (45,44%) para a região Sudeste (Figura 54 e Tabela 15) referente a estratégia VRS_GRADE e VRS_ETEC, respectivamente.

Em linhas gerais, com base nos resultados apresentados concernentes aos dez dias de alta densidade eletrônica da região Nordeste, o modelo de estimativa do TEC em 5 dias (50% da amostra) foi mais eficiente que o modelo de Grade (4 dias, ou seja 40%) e o modelo global (1 dia, sendo 10%). Já a região Norte, o modelo que apresentou os melhores resultados foi o de estimativa de TEC (80% da amostra), seguido do modelo de Grade (20%). No que diz respeito a região Central o modelo global do IGS (50%), de estimativa de TEC (40%) e de Grade (10%) são nesta ordem, as estratégias que apresentaram os menores EMQ3D, mas, as discrepâncias entre os modelos são na maioria das vezes inferiores há 7 cm. Do mesmo modo, no que concerne a Região Sul o modelo de estimativa de TEC (70%), seguindo do modelo Global (20%) e de Grade (10%) são os que melhor modelam a ionosfera, reduzindo o EMQ 3D.

No que diz respeito à região sudeste, sendo esta a mais crítica da ionosfera, com base nos resultados pode-se notar que ainda não há um modelo completamente eficiente que satisfaça todas as condições ionosféricas, pois embora a estratégia IGS foi o melhor modelo

em 50% dos dias de estudo (24 e 28 de Fevereiro, e 25, 26 e 28 de Outubro), nestes dias a intensidade ionosférica (Figura 40) era menos intensa e resultou em EMQ 3D médio na ordem de 33 cm (Tabela 15). Por outro lado, os dias remanescentes são os que apresentaram os maiores erros variando de 72 cm à metros, deste modo, a estratégia VRS_GRADE e VRS_ETEC representam 30% e 20% dos dias de estudo que os respectivos modelos foram melhores que o global (VRS_IGS).

Vale ressaltar que nos dias concernentes a quantidade de manchas solares máximas de 2014 para a região Sudeste (26 de Fevereiro de 2014) e Sul (27 de Fevereiro de 2014) os modelos ionosféricos regionais obtiveram boa performance. No que diz respeito a região Sudeste, o EMQ 3D atinge precisão métrica, na ordem de 1,17m quando adotado o modelo global, já empregando os modelos regionais a eficiência é de 14,01% e 45,43%, representando 16,52cm e 53,58cm de melhora ao utilizar o modelo de estimativa de TEC e de Grade, respectivamente. No caso da região Sul, há uma redução do erro na ordem de 7,77 cm, que representa uma melhora de 13,92% empregando o modelo de Grade.

Por outro lado, vale ressaltar que na maioria dos dias de estudo, o período de baixa densidade de elétrons comprova a supremacia na utilização do modelo de Grade e de estimativa do TEC para correção do erro ionosférico nas regiões brasileiras ao invés de adotar um modelo global como o IGS, evidenciado nos resultados apresentados concernentes a região Sudeste, Central e Norte. No que diz respeito a região sudeste (Figura 55 e Tabela 16) a discrepância máxima é de 24,05cm (melhora de 84,54%) e 15,15cm (melhora de 72,45%) em relação ao IGS, utilizando respectivamente o modelo de Grade e estimativa do TEC. Do mesmo modo, a discrepância máxima da região Central (Figura 51 e Tabela 12) é na ordem de 11,98 cm (melhora de 18,71%) e 10,66 cm (melhora de 16,64%). No que concerne a região Norte (Figura 49 e Tabela 10) há uma melhora significativa de 17,03cm (melhora de 68,77%) e 16,21cm (melhora de 65,47%) referente a estratégia VRS_GRADE e VRS_ETEC, respectivamente.

No entanto, para as regiões remanescentes, Nordeste (Figura 47e Tabela 8) e a Sul (Figura 53e Tabela 14 – com exceção ao dia 28 de outubro, porém com discrepância inferior a 3 mm) o modelo de Grade mostrou-se eficiente em todos os dias de estudo, atingindo uma discrepância de 10,78cm (melhora de 53,21%) e 4,88cm (melhora de 54,42%).

De modo geral, é possível afirmar que o modelo de estudo que melhor modela a ionosfera, ou seja, o qual obteve o menor EMQ é o de Estimativa de TEC (52%, sendo que 26

casos foi melhor), seguido do IGS (26%, ou seja em 13 casos foi melhor) e de Grade (22%, o que representa 11 dias) para o período de alta atividade ionosférica. Já no que concerne ao período de baixa densidade de elétrons o modelo de Grade foi em 86% (43) dos dias de estudo melhor que o de estimativa do TEC, com 6 dias (12%) e, o modelo Global, com apenas 1 dia (2%) melhor na qualidade do posicionamento.

Outro ponto que merece ser destacado é que embora o Modelo do IGS seja um modelo global e no Brasil sua rede é pouco densificada, a estratégia apresentou boa performance, e em alguns dias, principalmente no que diz respeito a região Central e Sudeste, foi melhor que os modelos regionais. Sendo assim, tais dias, deverão ser investigados e estudos mais detalhados devem ser realizados, e além disso, recomenda-se que outros modelos de mitigagem ionosférica sejam empregados.

4.2.2 Análise dos Mapas Ionosféricos Globais e do projeto MIMOSA

Nessa seção são apresentados as análises referente a comparação entre os resultados do posicionamento em rede utilizando arquivos IONEX fornecidos pelo MIMOSA, *Natural neighbor* (VRS_N), *Cubic* (VRS_C) e *Lowess* (VRS_L) e arquivos globais combinados do IGS (VRS_IGS), descritos na seção 3.2.2.2. A Figura 56 (a) e Figura 57 (a), juntamente, com a Tabela 17 e Tabela 18 apresentam o EMQ 3D dos dias de estudo de 2014 e 2015 referente a alta e baixa atividade ionosférica, respectivamente. A Figura 56(b) e Figura 57 (b), referem-se a porcentagem de melhora em relação IGS, onde os valores positivos referem-se as porcentagens que estão acima do valor concernente ao processamento utilizando o arquivo do IGS, ou seja, apresentam acurácia melhor que a estratégia VRS_IGS, e os valores negativos apresentam acurácia inferior.

Vale destacar, como pode ser observado nos gráficos apresentados nas Figuras a seguir (Figura 56 (a) e Figura 57 (a)) não são representadas algumas estratégias, pois nestes casos, os arquivos IONEX fornecido pelo projeto MIMOSA não foram disponibilizados.

Figura 56– EMQ 3D do PPP no modo Cinemático das Estratégias de Estudo (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b) em 2014

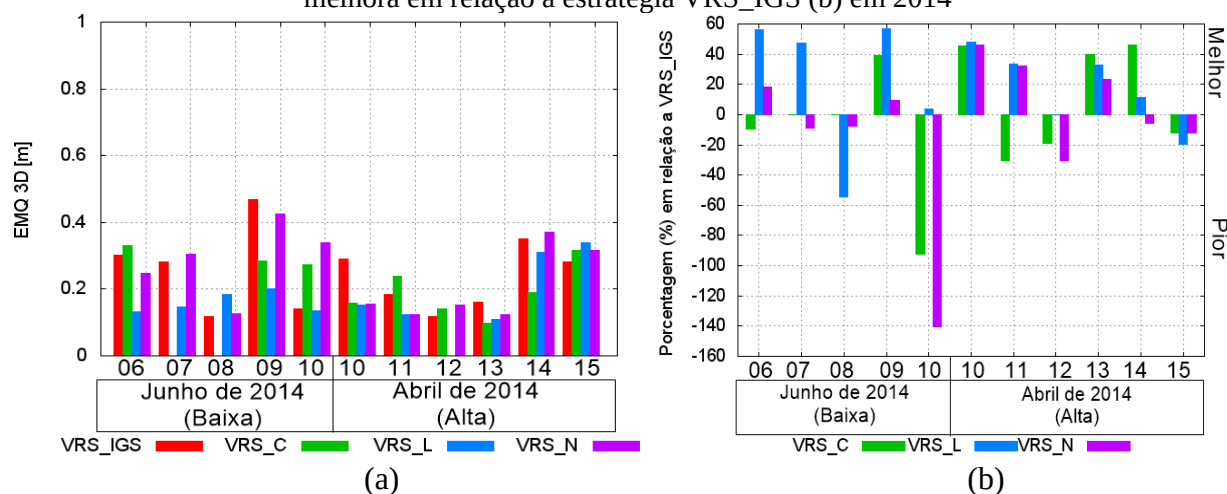


Tabela 17 – EMQ 3D do PPP no modo Cinemático das Estratégias de Estudo e a discrepância em relação a estratégia VRS_IGS em 2014

Dia	EMQ 3D (m)				Discrepância (em cm)		
	VRS_IGS	VRS_C	VRS_L	VRS_N	IGS– C	IGS– L	IGS– N
06/jun	0,3020	0,3310	0,1321	0,2466	– 2,9046	16,9849	5,5321
07/jun	0,2809	–	0,1471	0,3053	–	13,3817	– 2,4365
08/jun	0,1186	–	0,1833	0,1276	–	– 6,4689	– 0,8951
09/jun	0,4682	0,2844	0,2021	0,4242	18,3783	26,6046	4,3983
10/jun	0,1412	0,2719	0,1357	0,3398	– 13,0656	0,5531	– 19,8537
10/abr	0,2899	0,1583	0,1514	0,1562	13,1606	13,8479	13,3755
11/abr	0,1833	0,2392	0,1225	0,1238	– 5,5886	6,0803	5,9559
12/abr	0,1172	0,1397	–	0,1527	– 2,2479	–	– 3,5471
13/abr	0,1602	0,0963	0,1081	0,1226	6,3909	5,2120	3,7662
14/abr	0,3495	0,1885	0,3094	0,3703	16,1008	4,0093	– 2,0744
15/abr	0,2821	0,3153	0,3378	0,3166	– 3,3164	– 5,5648	– 3,4475

Figura 57–EMQ 3D do PPP no modo Cinemático das Estratégias de Estudo (a) e a porcentagem de melhora em relação a estratégia VRS_IGS (b) em 2015

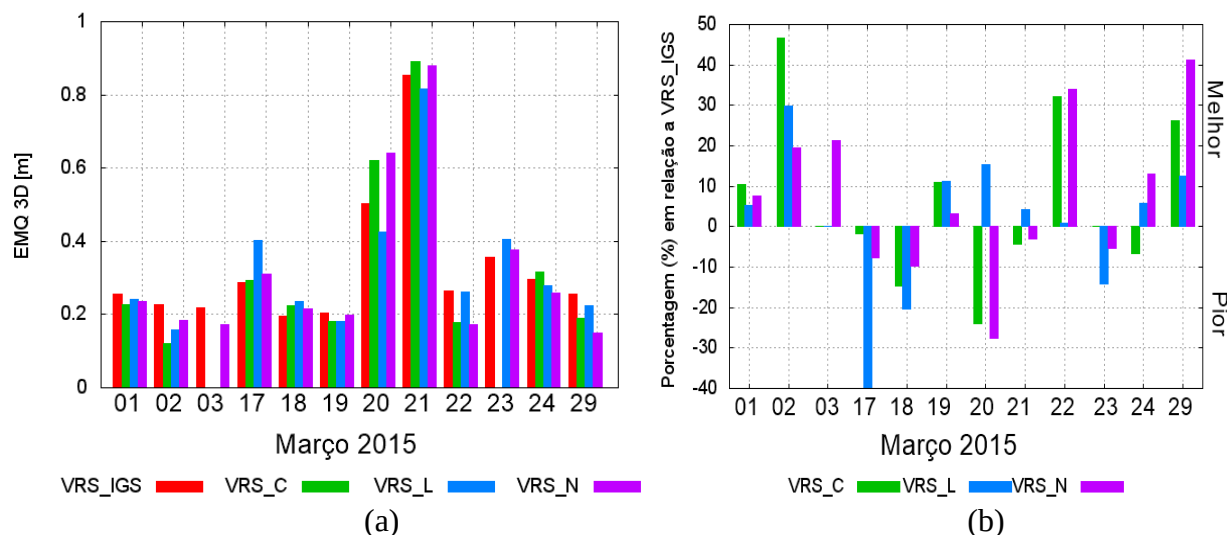


Tabela 18– EMQ 3D do PPP no modo Cinemático das Estratégias de Estudo e a discrepância em relação a estratégia VRS_IGS em 2015

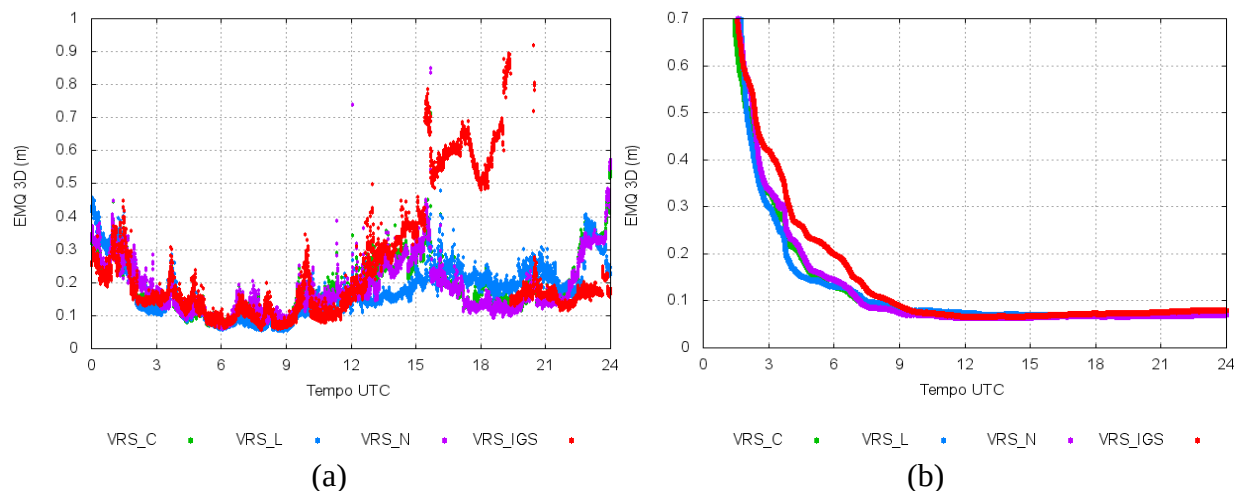
Dia	EMQ 3D				Discrepância em Relação VRS_IGS		
	VRS_IGS	VRS_C	VRS_L	VRS_N	IGS– C	IGS– L	IGS– N
01/mar	0,2550	0,2282	0,2413	0,2355	2,6860	1,3714	1,9488
02/mar	0,2270	0,1213	0,1590	0,1826	10,5619	6,7918	4,4362
03/mar	0,2191	–	–	0,1725	–	–	4,6589
17/mar	0,2883	0,2931	0,4028	0,3105	– 0,4865	– 11,4558	– 2,2254
18/mar	0,1959	0,2245	0,2360	0,2152	– 2,8534	– 4,0103	– 1,9304
19/mar	0,2040	0,1818	0,1811	0,1976	2,2201	2,2835	0,6355
20/mar	0,5017	0,6218	0,4253	0,6406	– 12,0102	7,6380	– 13,8933
21/mar	0,8537	0,8913	0,8165	0,8795	– 3,7653	3,7163	– 2,5802
22/mar	0,2634	0,1787	0,2613	0,1738	8,4715	0,2099	8,9619
23/mar	0,3563	–	0,4065	0,3750	–	– 5,0132	– 1,8673
24/mar	0,2963	0,3158	0,2791	0,2577	– 1,9492	1,7132	3,8566
29/mar	0,2567	0,1892	0,2247	0,1507	6,7446	3,2008	10,6030

Com base nos resultados obtidos (Figura 56 e Figura 57; Tabela 17 e Tabela 18), é possível afirmar que os mapas ionosféricos que utilizam dados regionais, bem como maior resolução espacial e temporal, possibilitam mais detalhes quanto à ionosfera, como são os fornecidos pelo projeto MIMOSA, possibilitando uma melhor modelagem da ionosfera. Tal fato pode ser verificado, principalmente, em dias de alto índice de cintilação ($S4 \geq 0,7$), como por exemplo, 2 de março de 2015 (Figura 57), 10 de Abril de 2014 (Figura 56), e 29 de Março de 2015 (Figura 57), onde as estratégias VRS_C, VRS_L, e VRS_N apresentam uma melhora de 46,56%, 47,78%, 26,29%, respectivamente, em relação ao IGS.

A figura a seguir (Figura 58) apresenta o resultado do EMQ 3D época por época, no modo cinemático (a) e no modo estático (b) do dia 10 de Abril de 2014, cujo erro posicional concernente as VRSs com correção ionosférica proveniente dos IONEX do projeto MIMOSA (EMQ 3D ~ médio de 15 cm) é duas vezes menor que do IGS (29 cm), o que resulta em uma melhora de aproximadamente 51% considerando 24 horas de dados.

Nota-se que os mapas fornecidos pelo projeto MIMOSA, no modo Estático (Figura 58 (b)), apresentam consideráveis melhorias em relação aos mapas globais do IGS quanto a convergência mais rápida, a estabilização e ao erro posicional.

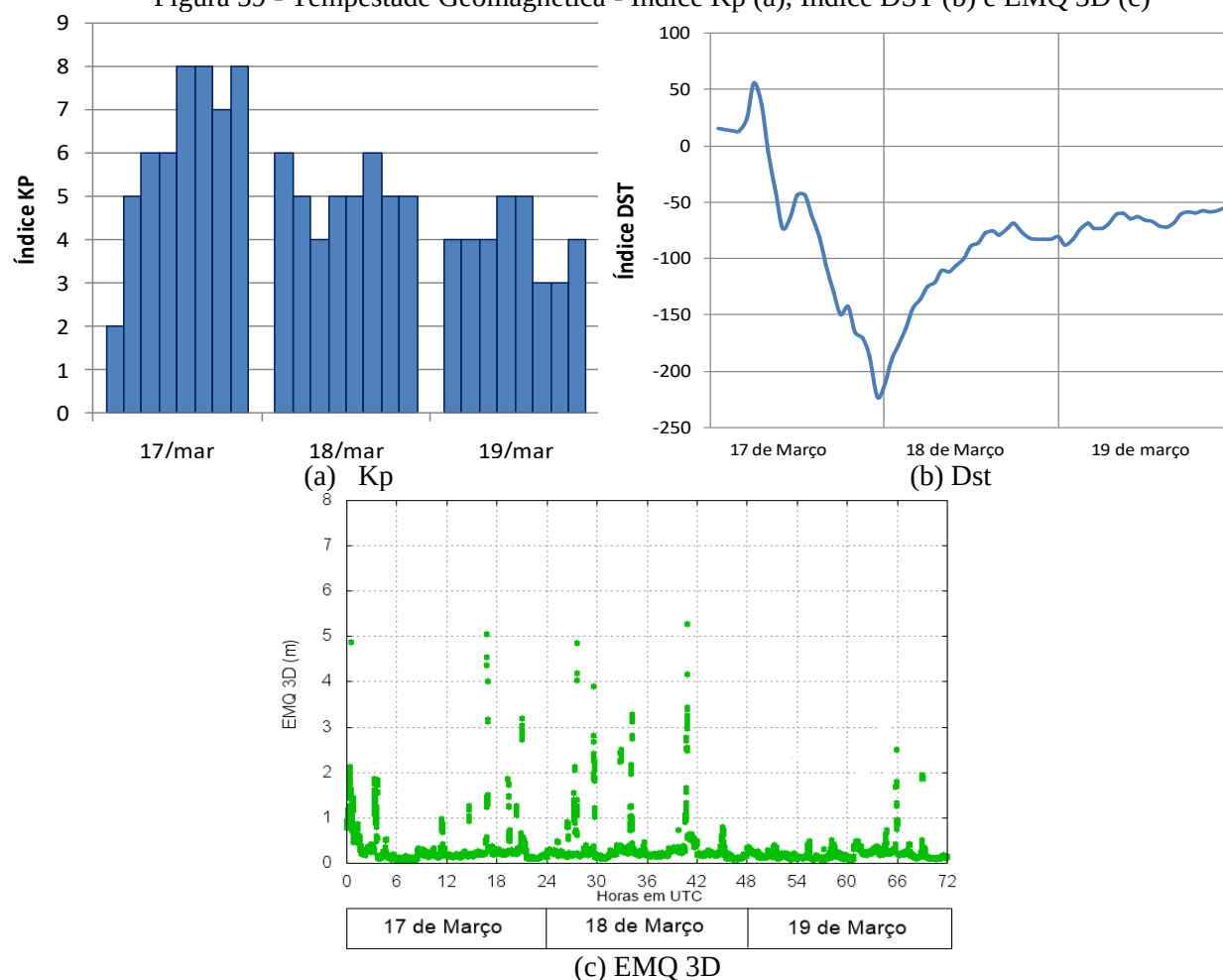
Figura 58 – EMQ 3D época por época no modo cinemático (a) e no modo estático (b) do dia 10 de Abril de 2014



Outro ponto importante a ser destacado é fato destes arquivos utilizarem informações adicionais quanto a cintilação ionosférica para geração do IONEX, o que torna a correção do erro ionosférico mais adequado e eficaz. Deste modo, nota-se, com base na Figura 58 (b) que no período de maior densidade de elétrons (17 – 21 UTC, ou seja 14 – 18HL) o modelo do IGS evidência a influência da ionosfera no posicionamento, apresentando um erro superior à 50 cm, enquanto os modelos do MIMOSA neste mesmo período obtêm os melhores resultados, inferior à 30 cm.

Por outro lado, como pode ser observado na Figura 57, há uma alta correlação entre os índices geomagnéticos (Kp - em (a) e Dst em (b)) e o resultado época por época do EMQ 3D (em (c)) durante e após a tempestade geomagnética. A fase principal da tempestade, que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice, foi iniciada no dia 17 de março de 2015 as 8 horas (UTC), e atinge seu mínimo as 23 horas (Figura 59 (b)). Nota-se que desde a fase inicial à fase de recuperação, que encerra as 20 horas do dia 18 de março, o EMQ 3D apresenta os valores máximos, atingindo 5,4 metros. Além disso, como base nos índices pode-se classificar esta tempestade como Intensa (Quadro 3) e de atividade geomagnética perturbada (Quadro 4)

Figura 59 - Tempestade Geomagnética - Índice Kp (a), Índice DST (b) e EMQ 3D (c)



Em suma, considerando os 23 dias de estudo, bem como os arquivos fornecidos pelo projeto, pode-se verificar no Quadro 7 que em 17 casos (73,91%) os resultados com os IONEX do MIMOSA foram melhores que do IGS.

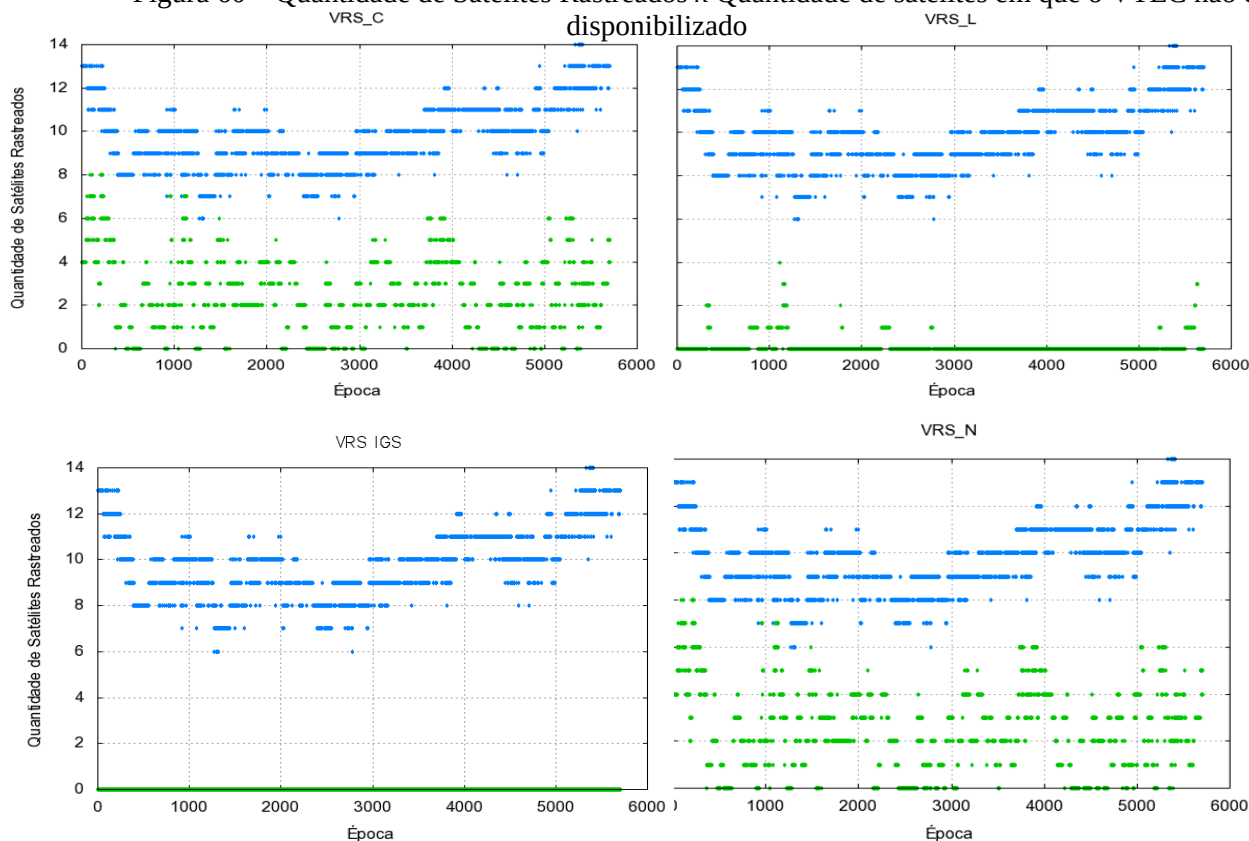
Quadro 7– Dias de estudo em que cada estratégia foi melhor

Estratégia	Total de IONEX Disponíveis	Dia do Ano	Total	Porcentagem (%) do total*
VRS_IGS	23	08 de Junho de 2014 12 e 15 de Abril de 2014 17, 18 e 23 de Março de 2015	6	26,09
VRS_C	19	13 e 14 de Abril de 2014 1 e 2 de Março de 2015	5	26,36
VRS_L	21	6, 7, 9 e 10 de Junho de 2014 10 e 11 de Abril de 2014 19, 20 e 21 de Março de 2015	9	42,85
VRS_N	23	3, 22 e 24 de Março de 2015	3	13,04

* Porcentagem em relação ao total dos arquivos disponibilizados

Como pode ser observado no Quadro 7, os resultados obtidos com a VRS_L se destacam em relação aos demais IONEX fornecidos pelo projeto, pois é a melhor estratégia em 9 dias (42,85%) de estudo. Uma justificativa é o fato da mesma ter em seus arquivos uma maior quantidade de dados, se comparados com VRS_C e VRS_N. A Figura 60 apresenta a quantidade de satélites rastreados (em Azul) e a quantidade de satélites em que o VTEC não é disponibilizado (em Verde) por época, para o dia 161 (10 de Junho) para os métodos.

Figura 60 – Quantidade de Satélites Rastreados x Quantidade de satélites em que o VTEC não é disponibilizado



4.3 Avaliação do desempenho do posicionamento sob influência da cintilação Ionosférica

Nessa seção, são apresentados os resultados e análises da influência da cintilação no posicionamento, descritos na seção 3.2.3. A Figura 61 a Figura 63 apresentam o índice de cintilação médio diário para o ano de 2012–2014 das estações POAL, PALM e PRU2, respectivamente. Nota-se a influência das manchas solares nos valores do índice de cintilação, sendo os valores de maior magnitude concernentes ao pico do ciclo solar 24, ou seja, no ano de

2014. Este efeito pode ser notado comparando as séries temporais de índice de cintilação das três estações de estudos apresentadas. No que diz respeito à estação POAL, embora localizada em região de médias latitudes, ou seja, com menor efeito ionosférico, no ano de 2014 o índice de cintilação médio obteve um aumento de 6,4 % em relação a 2012. Do mesmo modo, o índice S4 médio em 2014 da estação PALM e PRU2 obtiveram um aumento de 17,0 e 6,7%, respectivamente, em relação ao ano de menor intensidade da atividade solar (2012).

Figura 61 – Índice de Cintilação S4 médio diário da estação POAL

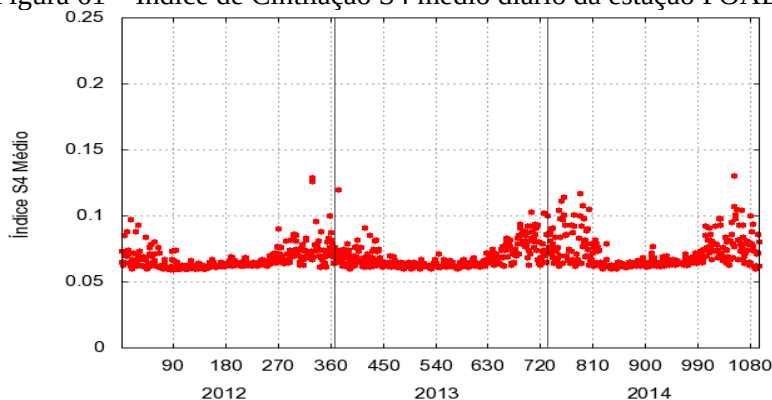


Figura 62 – Índice de Cintilação S4 médio diário da estação PALM

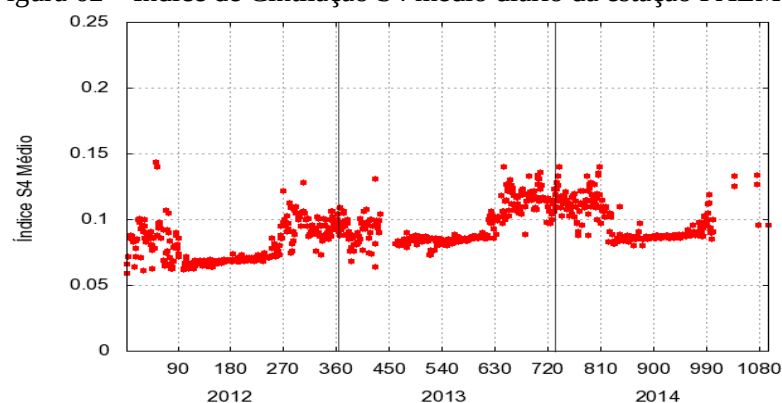
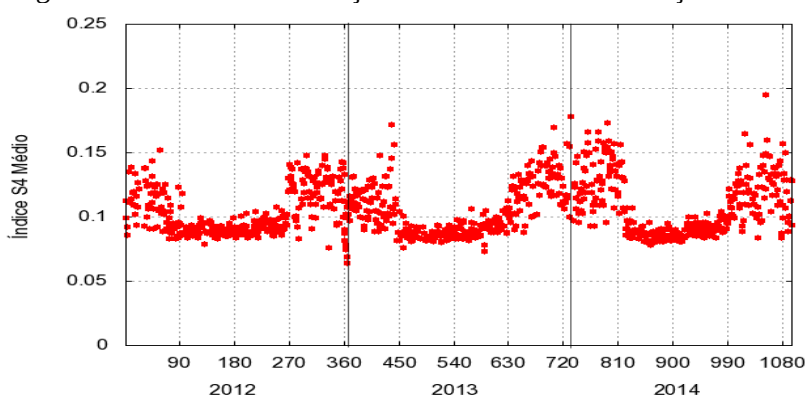


Figura 63 – Índice de Cintilação S4 médio diário da estação PRU2



No que diz respeito a Figura 61 a Figura 63, apresentadas anteriormente, por se tratar da média diária de todos os satélites do índice S4, estes dados podem mascarar algumas análises. Deste modo, é representado na Figura 64 a Figura 66 o índice de cintilação médio superior a 0,5 ($S4 > 0,5$), juntamente com os resultados diários do EMQ 3D do PPP no modo estático dos anos 2012 à 2014, das estações POAL, PALM e PRU2, respectivamente. Deste modo, é possível verificar uma possível correlação visual entre as duas grandezas, com base na análise das linhas de tendências das séries.

Figura 64 – EMQ 3D do PPP modo Estático e o índice de cintilação $S4 > 0,5$ médio da estação POAL

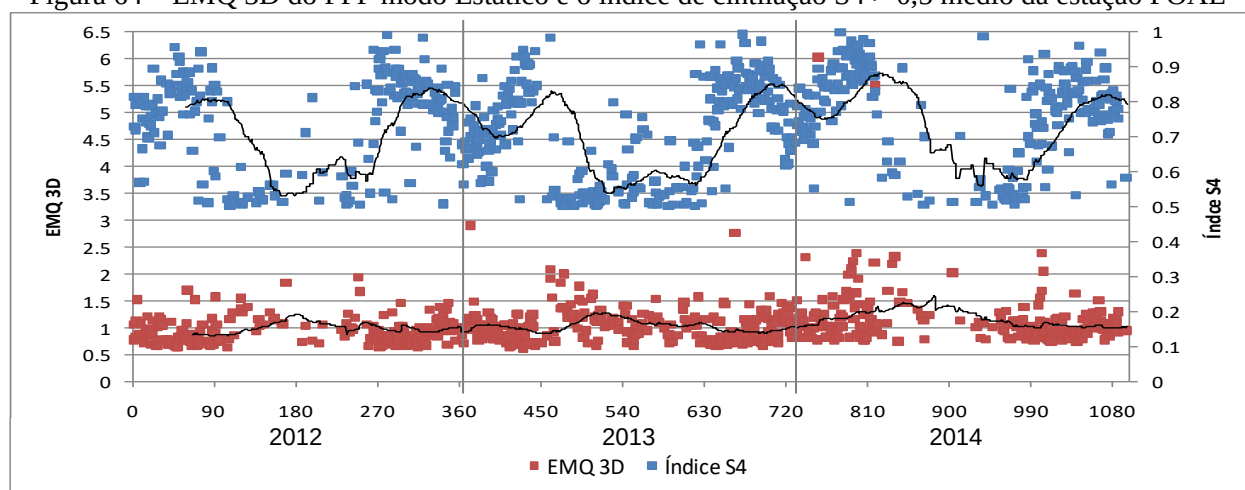


Figura 65 –EMQ 3D do PPP modo Estático e o índice de cintilação $S4 > 0,5$ médio da estação PALM

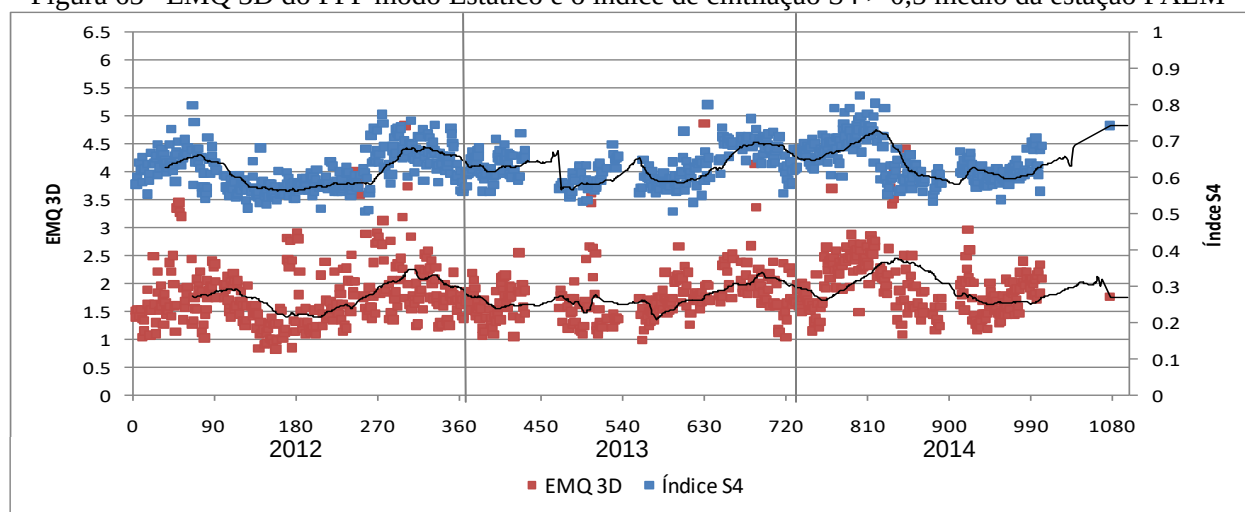
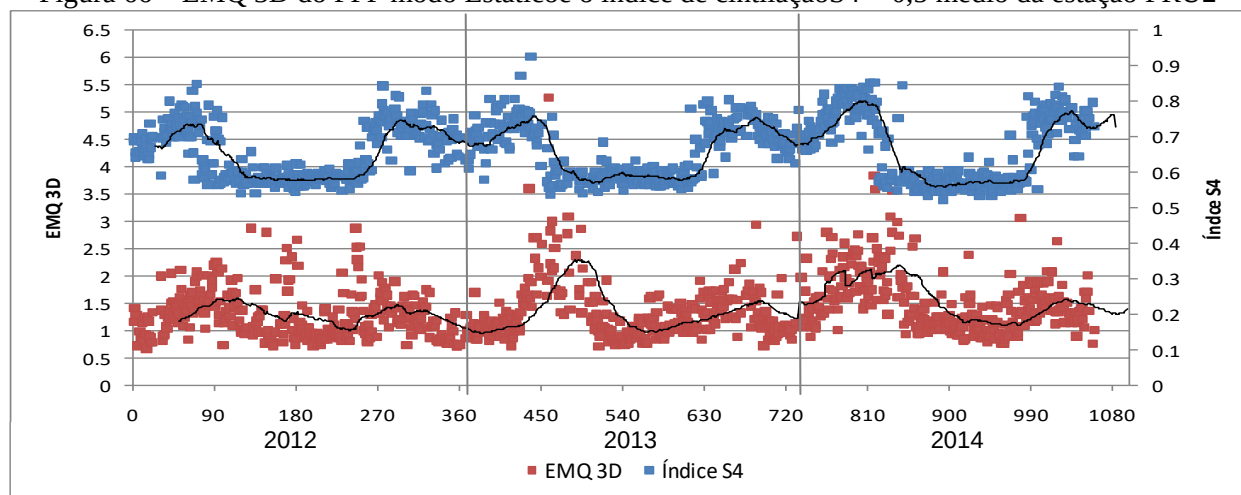


Figura 66 – EMQ 3D do PPP modo Estático e o índice de cintilação $S4 > 0,5$ médio da estação PRU2



Como pode ser observado na Figura 64 a Figura 66, é nítida a influência da variação sazonal da cintilação ionosférica no posicionamento, para estação de PALM e de PRU2, principalmente quando verificada a linha de tendência das séries temporais. Ao relacionar o erro do posicionamento com o índice de cintilação ionosférica $S4$, nota-se que no período de intensas irregularidades ionosféricas, que vai do equinócio de primavera (Setembro – Novembro) ao equinócio de Outono (Março e Abril), foram obtidos os maiores valores de erro (EMQ 3D), sendo superiores a 3m. Em contra partida, no solstício de inverno (Junho–Agosto) esses valores são reduzidos em torno de 3 vezes, obtendo um EMQ em torno do metro ou sub-metro.

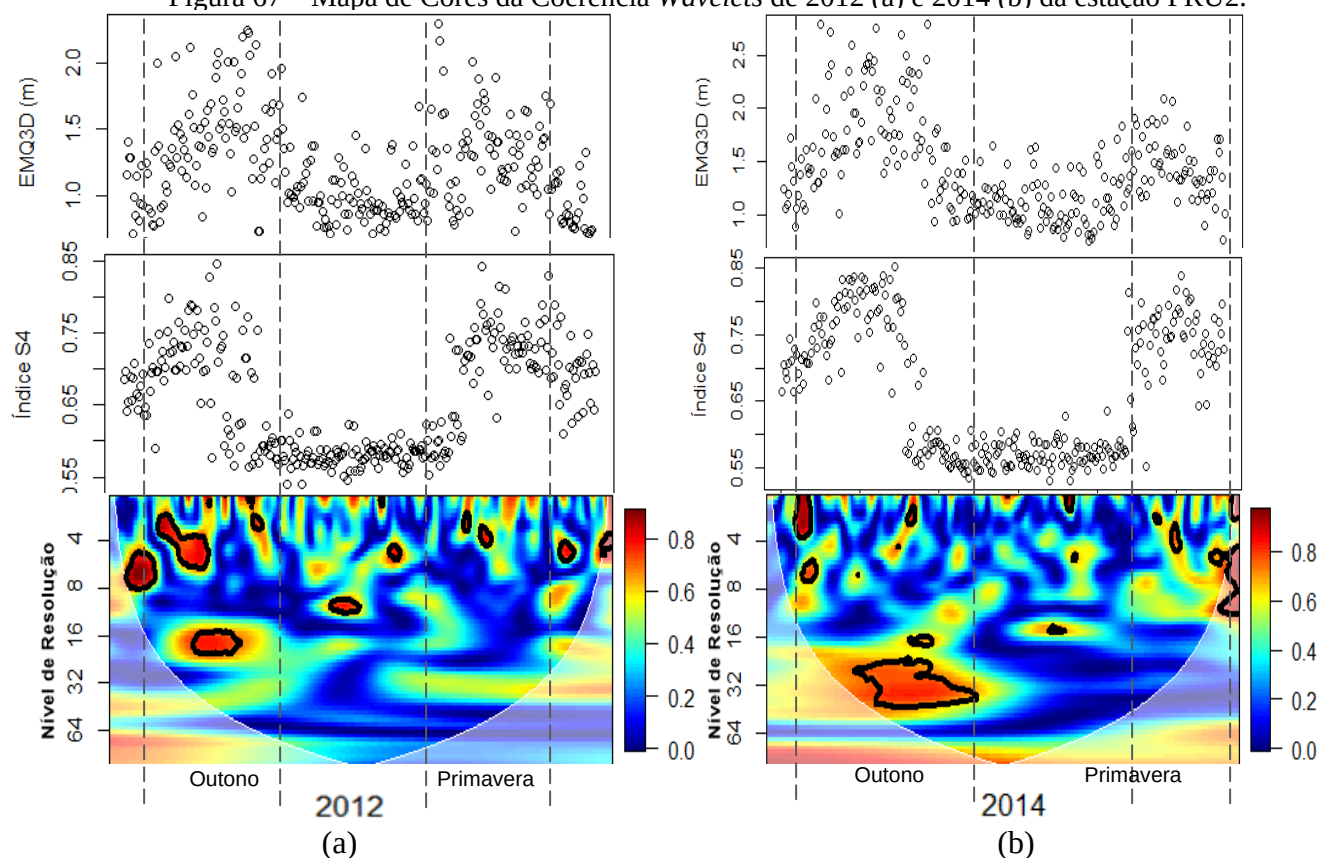
No entanto, esta alta correlação gráfica, não condiz com a correlação numérica obtida no *software R* método *Spearman*, de 0,305 e 0,27, para estação PALM e PRU2, e uma decorrelação de 0,16 para estação POAL. No que concerne a correlação anual da estação PALM, tem-se 0,36, 0,17 e 0,37 para 2012, 2013 e 2014 respectivamente, do mesmo modo, tem-se 0,14, 0,08 e 0,27 para estação PRU2, e por fim, há uma decorrelação de 0,21, 0,22 e 0,04, para estação de POAL. Esta baixa correlação apresentada, mesmo empregando o método mais apropriado devido a assimetria dos dados, mostra que a função empregada é sensível a pequenas variações dos valores concernentes ao EMQ3D e o índice $S4$, pois principalmente no período do solstício de inverno há pontos fora da tendência. Assim, foi avaliado a correlação após a exclusão destes pontos (Tabela 19).

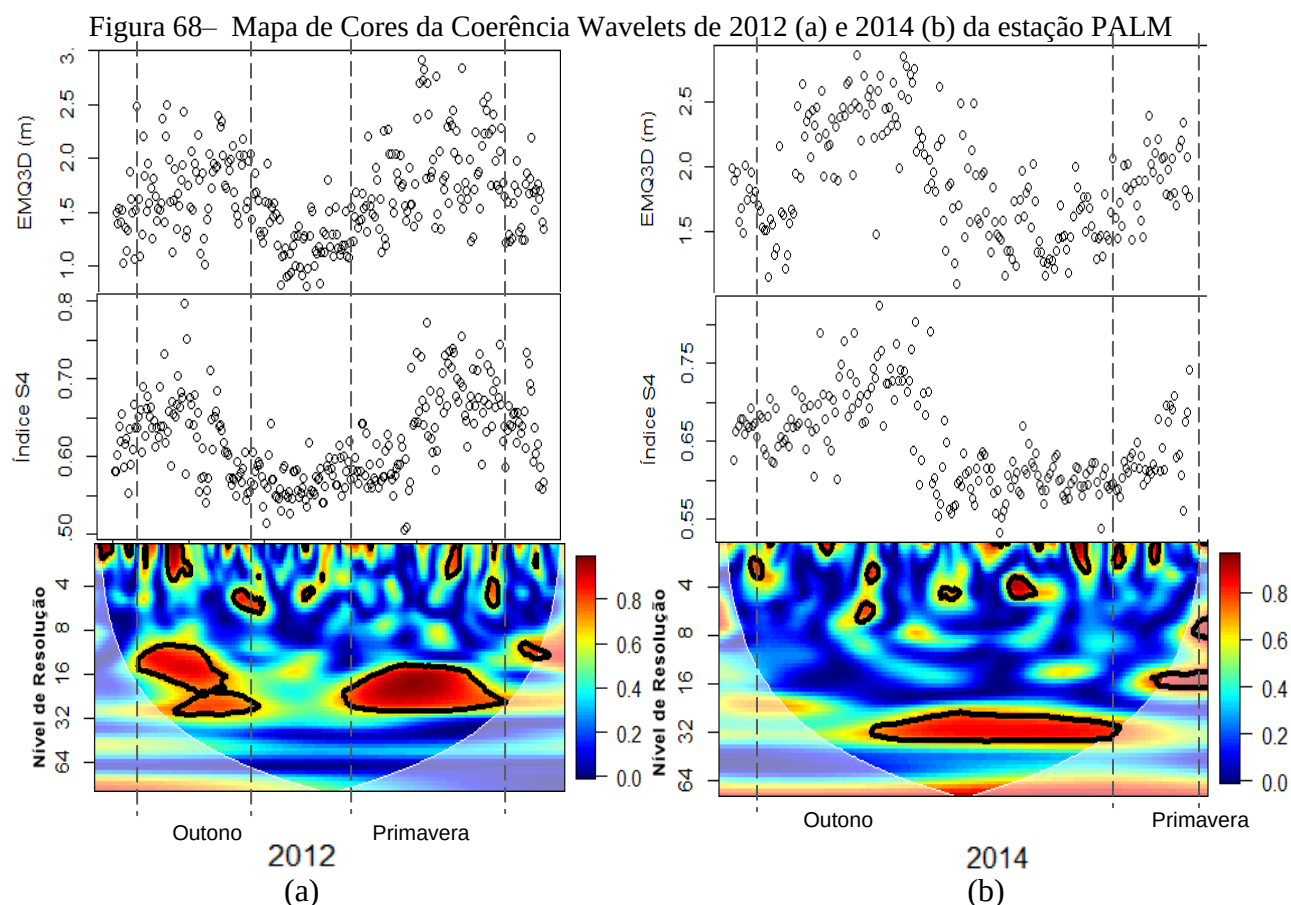
Tabela 19– Correlação entre EMQ 3D do PPP e o índice S4 (Após a remoção dos dados)

Estação	Correlação de 2012	Correlação de 2013	Correlação de 2014	Correlação Triannual
POAL	– 0,32	– 0,34	0,05	– 0,21
PALM	0,45	0,25	0,53	0,46
PRU2	0,29	0,15	0,51	0,31

Com base nas correlações apresentadas na Tabela 19, foram avaliadas a partir da técnica coerência *wavelets*, as séries temporais de 2012 e 2014 das estações PALM e PRU2, já que estas apresentaram as maiores correlações. A Figura 67 e Figura 68 apresentam o mapa de cores da coerência *wavelets* da série de 2012(a) e 2014(b) para a estação PRU2 e PALM, respectivamente, sendo que as correlações maiores são representadas pelas cores quentes, já as cores frias são concernentes a correlação baixa. Vale ressaltar que a correlação máxima das três séries das estações ocorreu no pico de atividade solar do ciclo 24, 2014, onde tal fato influencia diretamente as partículas ionizadas, bem como intensifica as irregularidades ionosféricas.

Figura 67– Mapa de Cores da Coerência Wavelets de 2012 (a) e 2014 (b) da estação PRU2.





Através dos mapas de cores da coerência *wavelets* apresentados anteriormente (Figura 67 e Figura 68), padrões e/ou informações escondidas nas séries dos índices S4 de cintilação e Posicionamento, que não puderam ser identificadas no domínio do tempo, podem ser explicitadas no domínio espaço–frequência. Portanto, torna possível a investigação dos efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento, ou seja, determinar a correlação no domínio espaço–frequência. Deste modo, a série é decomposta por níveis de resolução, relacionados às escalas 2^j ⁹, sendo possível caracterizar a série em termos da escala que concentra maior correlação. O Quadro 8 fornece uma interpretação da frequência de decomposição em multiescala por *wavelets* (NASON, 1995e 2008; CHATFIELD, 2003; SOUZA, 2014)

⁹ É possível analisar um sinal em várias escalas de resolução, também encontrada na literatura como escala j . Mais detalhes em SOUZA, 2014; NASON, 1995 e 2008

Quadro 8– Interpretação da frequência de decomposição em multirresolução *wavelets*

Nível de Resolução	Resolução de Frequência	Dados Diários
1	2– 4	2 à 4 Dias
2	4– 8	4 à 8 dias
3	8– 16	8 à 16 Dias
4	16– 32	16 à 32 Dias
5	32– 64	32 à 64 Dias
6	64– 128	64 à 128 Dias

Fonte: Adaptado de Souza (2014)

Nota– se que a série temporal de 2012 da estação PRU2 (Figura 67(a)) o pico do equinócio de outono apresenta uma correlação de aproximadamente 90% na escala de nível de resolução 4 (intervalo de frequência 16– 32), representando uma periodicidade de aproximadamente um mês. Já no que concerne ao equinócio de primavera a correlação é de aproximadamente 60% na escala de nível de resolução 4. Outro ponto importante, é a influência sazonal da cintilação ionosférica no posicionamento, destacado na alta correlação na escala de nível de resolução 6 (2 à 4 meses) no período de Outono de 2012.

Com base na Figura 67 (b) referente à série temporal da estação PRU2, nota– se que há uma alta correlação entre a série de cintilação e posicionamento ao longo de 2014 na escala de nível de resolução 6 (periodicidade de 2 à 4 meses), em concordância com a correlação numérica de 0,51, apresentada na Tabela 19, relacionado principalmente com a influência sazonal (cuja estações do ano são associadas a 3 meses), sendo que no período dos equinócios de primavera e outono, apresentando uma correlação de aproximadamente 60 à 90%, respectivamente. No que refere–se a este último, na escala de nível de resolução 5 (periodicidade de 32 dias à 2 meses) a correspondência entre as séries incia–se no pico do equinócio de outono e se estende ao início do solstício de inverno variando entre 70 à 80% de correlação, já o pico da primavera é melhor correlacionado pela periodicidade 8 à 16 dias, com aproximadamente 60%.

No que concerne a análise do efeito da cintilação ionosférica no posicionamento da estação PALM em 2012 (Figura68 (a)), nota– se que a correlação é máxima na escala de nível de resolução 4, atingindo uma correlação próxima à 100%, onde são representados os picos do equinócio e solstício, com periodicidade de 1 mês. Além disso, o

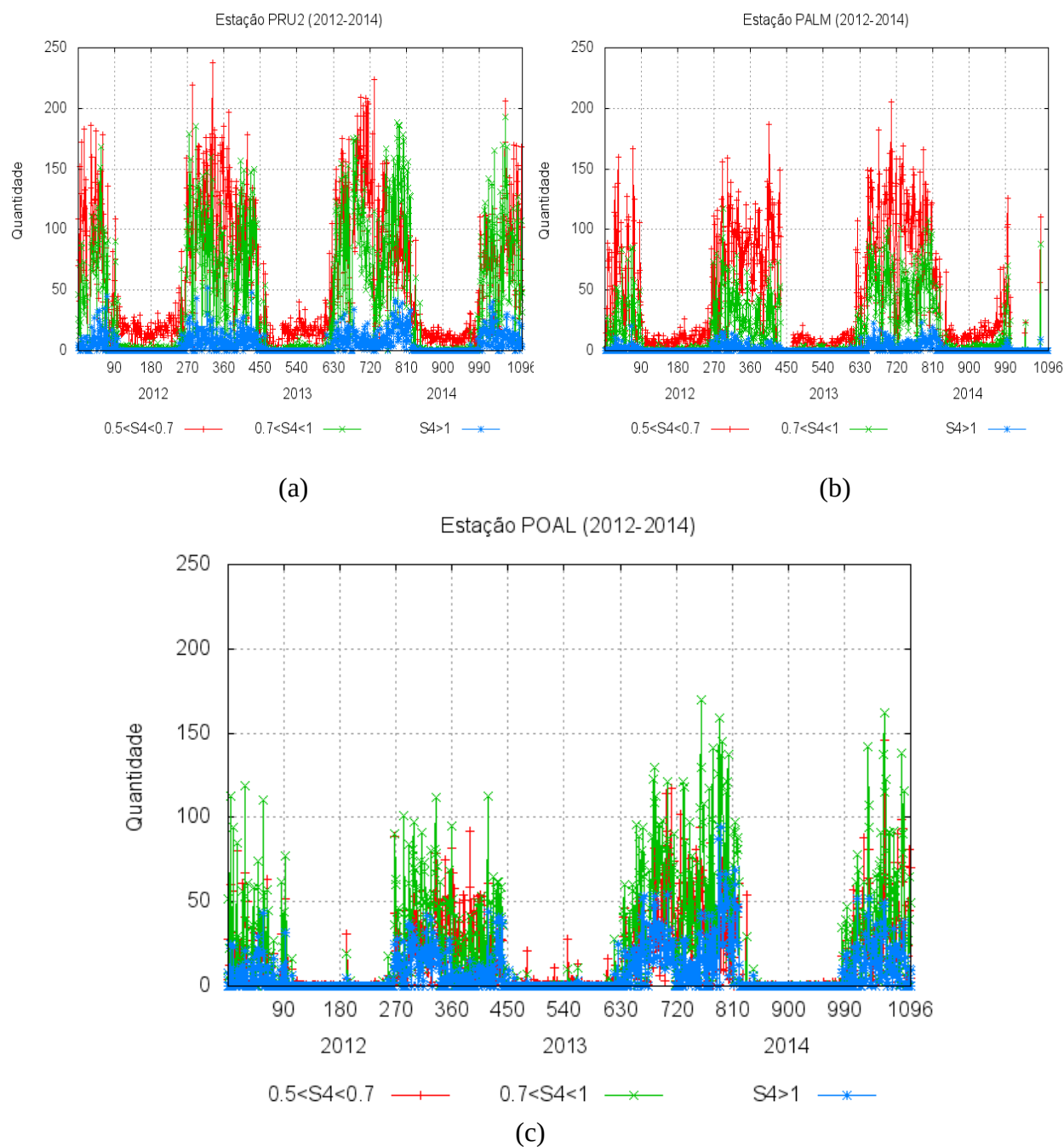
equinócio de outono na escala de nível de resolução 6 apresenta uma correlação na ordem de 70 à 80%.

No que diz respeito a Figura 68(b) referente à série temporal da estação PALM de 2014, nota-se que há uma alta correlação entre a série de cintilação e posicionamento em todo o período de 2014 na escala de nível de resolução 6, em concordância com a correlação numérica de 0,53, apresentada na Tabela 19 relacionada principalmente com a influência sazonal, sendo que no período dos equinócios de primavera e outono, apresentando uma correlação de aproximadamente 70 à 90%. Além disso, na escala de nível de resolução 4 há uma alta correlação na ordem de 70 à 90%, que inicia-se no pico do equinócio de outono e estende-se até o fim do solstício de inverno. Já no que concerne ao pico da primavera é melhor correlacionado pela periodicidade de 8 à 16 dias, com aproximadamente 80%.

Outro fator a ser destacado é a influência espacial, pois a cintilação ionosférica e consequentemente o erro no posicionamento, são maiores na região de baixas latitudes, como é o caso da estação PRU2. Este fato pode ser comprovado comparando os resultados obtidos no posicionamento, bem como a cintilação ionosférica, das estações PRU2 e POAL no equinócio de outono de 2013. Neste caso, é possível notar que o EMQ 3D da estação PRU2 é 2,5 vezes maior que para a estação POAL.

Assim, a estação de POAL, devido a sua localização, é menos vulnerável aos efeitos ionosféricos e irregularidades ionosféricas conforme já discutido nesta dissertação, e evidenciado na Figura 61. No entanto, a Figura 61 apresenta altos índices de S4, sendo na maioria das vezes superiores ao da região sudeste, isto pode ser justificado por se tratarem de dados de cintilação maiores que 0,5 e pela ponderação da média. A Figura 69 apresenta a quantidade de dados de cintilação ($S4 > 0,5$) empregados por dia. Note que embora a estação PRU2 e PALM resultarem em um número maior de dados diários utilizados, a estação POAL apresenta um número elevado de índices S4 entre 0,7 e 1 ($0,7 < S4 < 1$) maiores que 1 ($S4 > 1$), o que influencia diretamente a média e o comportamento da série de cintilação (Figura 61).

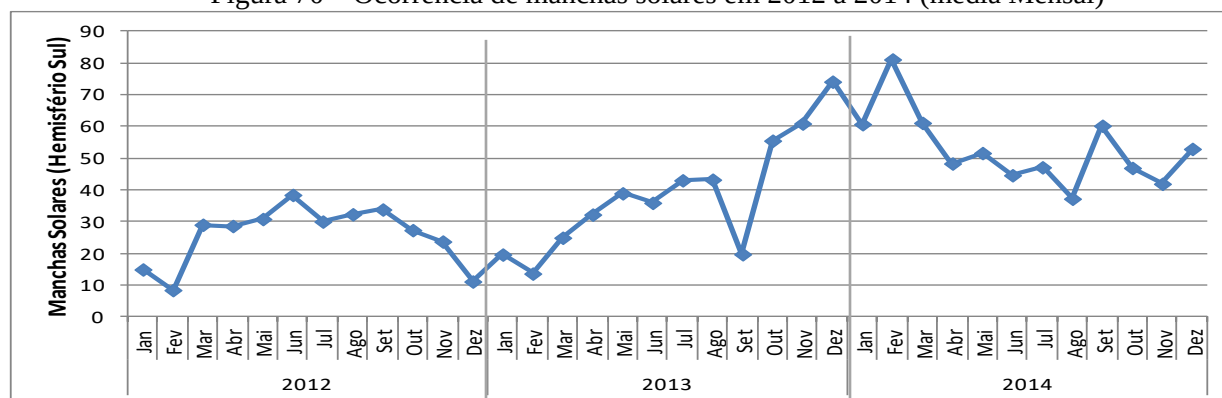
Figura 69– Quantidade de dados de cintilação ($S_4 > 0,5$) empregados por dia para o cálculo da média ponderada das estações PRU2(a), PALM(b) e POAL (c)



Além disso, nota-se, com base na Figura 64 a Figura 66, que os dois picos anuais do índice de cintilação S_4 , referentes aos meses de equinócio, são praticamente da mesma magnitude. Esta uniformidade dos picos, também pode ser justificada pelas ocorrências de manchas solares neste período da série, representadas na Figura 70, onde é apresentado o número

de manchas mensal. Neste caso, verifica-se que para os anos de 2013 e 2014 (pico do ciclo) há ocorrência de dois picos, novamente nos equinócios.

Figura 70 – Ocorrência de manchas solares em 2012 à 2014 (média Mensal)



Fonte: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/sunspot-numbers/hemispheric/tables>. Acesso em 02/07/2015

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa, apresentou-se uma revisão bibliográfica envolvendo a composição e formação da ionosfera e seus efeitos no posicionamento, assim como a investigação das irregularidades ionosféricas e variações do TEC, além de soluções e metodologias encontradas para mitigação dos efeitos da ionosfera.

Deste modo, pôde-se perceber a importância de estudos que contribuem para análise do efeito ionosférico no posicionamento, principalmente quando é necessário realizar posicionamento acurado. Além disso, a maior parte do território brasileiro está localizado na região do equador geomagnético, sendo esta a mais crítica para o posicionamento devido à ionosfera, o que torna pesquisas nesta área ainda mais relevantes.

Os resultados apresentados foram obtidos baseados na fundamentação teórica realizada, principalmente, no primeiro ano desta pesquisa. E tiveram como consequência a comprovação da teoria estudada, por meio da variabilidade do TEC, na qual foram embasados os experimentos desta dissertação.

Experimentos foram realizados visando a avaliação dos métodos de mitigação ionosférica no posicionamento em redes, onde foram considerados dois diferentes cenários: um de alta densidade de elétrons da ionosfera (dias 24 à 28 de fevereiro e 24 à 28 de outubro de 2014) e outro de baixa (19 à 23 de julho e 15 à 19 de julho de 2014). Deste modo, foram empregados quatro experimentos.

O primeiro experimento (Seção 4.1) se referiu a análise da performance dos mapas globais ionosféricos (IGS, CODE, ESA, JPL e UPC) empregados no posicionamento em redes em diferentes regiões brasileiras. De acordo com os resultados obtidos, nota-se que não há um único modelo fornecido pelos centros de análise do IGS que melhor se enquadra a realidade brasileira, além disso, o desempenho do mapa depende das condições ionosféricas e, principalmente, da localização da estação. No entanto, considerando o período de alta densidade de elétrons, pode-se concluir que os melhores mapas ionosféricos a serem utilizados na região Sul, Sudeste, Norte, Nordeste e Central, são os fornecidos pelo centro de análise UPC, JPL, ESA, ESA e JPL, respectivamente. Por outro lado, o mapa do centro do CODE foi o que apresentou os piores resultados no posicionamento em redes.

Com relação ao segundo experimento (seção 4.2.1), considerando o desempenho dos modelos de mitigação ionosférica: Estimativa do TEC, Mapas Ionosféricos, e o modelo de Grade empregados no posicionamento em redes pode-se concluir, com base nos resultados obtidos, que o modelo de estudo que melhor modela a ionosfera é o modelo de Grade seguido pelo modelo de Estimativa de TEC e IGS.

Além disso, nesta dissertação, foi analisado o desempenho do Mapa Global da Ionosfera, fornecido pelo IGS, e os Mapas Regionais do Projeto MIMOSA (Seção 4.2.3). Verificou, em conformidade com análise dos resultados anteriores (Seção 4.2.2), que os mapas ionosféricos que utilizam dados regionais, bem como, maior resolução espacial e temporal, possibilitam maior detalhamento da ionosfera, como são os arquivos fornecidos pelo projeto MIMOSA (Seção 4.2.3) e modelo Grade (seção 4.2.2), e conseqüentemente, proporcionam uma melhor modelagem da ionosfera. Outro ponto importante a ser destacado é fato dos arquivos fornecidos pelo projeto MIMOSA utilizarem informações adicionais quanto a cintilação ionosférica para geração do IONEX, o que torna a correção do erro ionosférico mais adequado e eficaz.

E por fim, o quarto experimento (Seção 4.3), avaliou o posicionamento por ponto sob a influência da cintilação ionosférica, onde foram considerados séries temporais de 3 anos (2012 a 2014) do índice S4 e EMQ 3D do processamento no modo estático de três estações brasileiras com condições ionosféricas distintas, PALM (Região Central), PRU2 (Região Equatorial) e POAL (Latitude Média). Verificou uma correlação de 53% e 51%, entre as séries de PALM e PRU2, e ainda considerando a análise do espaço-frequência em relação ao tempo pelo método coerência wavelets para avaliação da correlação da série, nota-se uma correlação no período do equinócio superior a 70%.

De uma forma geral, esta pesquisa contribuiu com o desenvolvimento científico nacional, visto que a modelagem ionosférica é de extrema importância para realizar posicionamento acurado no Brasil, por estar localizado em região equatorial e de baixa latitude. Além disso, o posicionamento em rede pode ser utilizado em inúmeras aplicações, ainda mais com a evolução da densificação da Rede RBMC.

Diante do exposto, considerando a experiência adquirida durante a execução dessa pesquisa, com base nas análises dos resultados e das dificuldades encontradas, e tendo em

vista que ainda há muito que se desenvolver em termos de aplicativos computacionais e estudos sobre o tema na região brasileira, têm-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- ✓ Empregar o RTK em rede em regiões da Rede GNSS/SP que apresentem estações de referência menos esparsas;
- ✓ Verificar o quão interfere o espaçamento entre as estações para a acurácia da geração da VRS;
- ✓ Avaliar os dados da VRS empregando o método relativo, e/ou, o PPP no modo estático;
- ✓ Realizar experimentos empregando diferentes constelações e observáveis GNSS em períodos de cintilação ionosférica e tempestade geomagnética;
- ✓ Investigar a acurácia para o modo de posicionamento em redes em Tempo-Real;
- ✓ Direcionar esforços para que se tenha a produção sistemática de mapas de VTEC na região brasileira, com informações adicionais da cintilação ionosférica, como os do Projeto MIMOSA;
- ✓ Investigar as modificações ocorridas na ionosfera e na performance do posicionamento em redes empregando os modelos de mitigação ionosférica na região brasileira no próximo período de mínima ocorrência de manchas solares;
- ✓ Estudar o impacto de explosões solares e outras tempestades geomagnéticas muito intensas na ionosfera e na performance do posicionamento em redes na região brasileira;
- ✓ Comparar a performance dos arquivos IONEX do IGS com outros modelos MOD_ION (CAMARGO, 1999), mapas ionosféricos gerados com dados de Rádio Ocultação, LPIM, entre outros para a correção do erro devido à ionosfera no posicionamento baseado em redes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, C. R. Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): Implementação em Tempo Real. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

AGUIAR, C. R. de Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS. 2010. (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ALEXANDER, D., RICHARDSON, I. G., ZURBUCHEN, T. H., A brief history of CME science. *Holanda, Space Science Rev.*, 2006.

ALVES, D. B. M. Desenvolvimento e Implantação do RTK em Rede para Posicionamento Geodésico no Estado de São Paulo, 2011. Pós-Doutorado – Universidade Estadual Paulista – Departamento de Cartografia, Presidente Prudente.

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

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

AQUINO, M; MONICO, J. F. G.; DODSON, A.; MARQUES, H. A. Mitigating the effects of ionospheric scintillations on position estimates. In: invited presentation to the 3rd European Space Weather Week, Brussels, 13–17 November, Proceedings... 2006.

ARIKAN, F.; NAYIR, H.; SEZEN, U.; ARIKAN, O. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS–TEC, *Radio Sci.*, 43, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785, 2008

ARMENDARIS, O. C.; MATSUOKA, M T; CAMARGO, P. O. Desempenho do Modelo Global da Ionosfera do IGS: avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 2, p.208–223, abr–jun, 2009.

AZPILICUETA, F. TEC Global Modelbasedon GPS andSatelliteAltimetryobservations. 2006. 73 f. DoctoradoTesis – Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.

BEIDOU, BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document. Open Service Signal (Version 2.0), December 2013. Disponível em < <http://www.beidou.gov.cn/attach/2013/12/26/20131226b8a6182fa73a4ab3a5f107f762283712.pdf>>. Acesso em 13/01/16.

BILITZA, D.; REINISCH, B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* v.42, p. 599–609, 2008.

BLANCH, J.; WALTER, T.; ENGE, P. Adapting Kriging to the WAAS MOPS Ionospheric Grid. In: 2003 National Technical Meeting Proceedings, Anaheim, California. 2003. Disponível em <<http://waas.stanford.edu>>. Acesso em: 10 out. 2014.

BRUNIN, C.; AZPILICUETA, F. GPS slant total electron content accuracy using the single layer model under different geomagnetic regions and ionospheric conditions. *Journal of Geodesy*. v.84, p.293–301, 2010.

CAMARGO, P. O. Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. 191p.

CAMARGO, P.O. & Dal Poz, W.R. Produção de mapas da ionosfera para o Brasil: primeiras experiências na FCT/UNESP. In: Mitishita, E.A. (ed.). *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba, Imprensa Universitária. 2002. vol.2, p. 80– 99.

CAMARGO, P.O.; PEREIRA, V. A. S. ARANA, D. Erro Sistemático Devido Ao Hardware Dos Satélites E Receptores. III Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente – SP, 25–27 de julho de 2012. v.1.

CHATFIELD, C. *The Analysis of Times Series: An Introduction*, Chapman and Hall: London, 2003.

CHOI, B.-K.; PARK, J.-U.; ROH, K. M.; LEE, S.-J. Comparison of GPS receiver DCB estimation methods using a GPS network. *Earth Planets Space*, Vol. 65 (No. 7), pp. 707–711, 2013.

CIRAOLO, L.; AZPILICUETA, F.; BRUNIN, C.; MEZA, A.; RADICELLA, S.M.. Calibration error on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. *Journal of Geodesy*, v.81, n.2, p.111–120, 2007

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the Effects of Ionospheric Scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System Availability. *Radio Science*, v. 38, 2003.

CPI Computational Physics, Inc. Colorado: Parameterized Ionospheric Model, 2015. Disponível em: <<http://www.cpi.com/>>. Acesso em: 14. Jan. 2015.

DALBELO; L. F. A. DGPS em Rede: Desenvolvimento e Implantação Via *Internet* Utilizando a Rede GNSS do Estado de São Paulo. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente;

DAL POZ, M. R.; CAMARGO, P. O. Consequências de uma tempestade Geomagnética no posicionamento relativo com receptores GPS de simples frequência. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 12, no 2, p.275– 294, jul– dez, 2006.

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

DATTA-BARUA, S. et al. Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS positioning. In: Proceedings of the ION GPS 2003. Portland (OR): [s.n.], 2003.

DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; MUELLA, M. T. H.; CAMPOS, A. A. N.; SMORIGO, P. F.; NETO, A. C. Characteristics of the low latitude ionospheric irregularities and their effects over GPS signal. Ionospheric scintillation: Scientific Aspects Space Weather and Services Workshop. Nottingham, Proceedings... 2008.

EULER, H. J.; KEENAN, R.; ZEBHAUSER, B. Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays. In: ION GPS 2001, Salt Lake City, Utah. Proceedings..., 2001.

FEDRIZZI, M.. Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS. 1999. 142p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FEDRIZZI, M. Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 223p.

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.

FOTOPOULOS, G. Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations. 2000. 202f. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

GARCÍA-FERNÁNDEZ, M. Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data. 2004. Ph.D. Thesis – Program in Aerospace Science & Technology, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Spain.

GURGEL, V. C. Aplicação de técnicas wavelets em análise de séries temporais para detecção de correlações. Monografia – Universidade Federal Ruraldo Semi- Árido (UFERSA), Angicos– RN 63f, 2013

HEISE, S.; JAKOWSKI, N.; WEHRENPENNIG, A.; REIGBER, C.; LÜHR, H.. Initial Results on Ionosphere/Plasmasphere Sounding based on GPS Data Obtained On Board CHAMP. 2003. Disponível em: <www.cosmic.ucar.edu/related_papers/2003_csm1_heise.pdf>. Acessado em: novembro de 2010.

HERNÁNDEZ– PAJARES, M.; JUAN, J.M; SANZ, J.; ORUS, R; GARCIA– RIGO, A.; FELTENS, J.; KOMJATHY, A.; SCHAER, S.C.; KRANKOWSKI, A. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998, Journal of Geodesy v.83, p.263–275, 2009

HONG, C. K. Efficient differential code bias and ionosphere modeling and their impact on the network-based GPS positioning. PhD dissertation. The Ohio State University, Ohio. 2007.

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

HU, G. R. Development and Assessment of GPS Virtual Reference Stations for RTK Positioning. **Journal of Geodesy**. v.77, p. 292-302. 2003.

IGS, International GNSS Service, Disponível em < <http://igs.org/products>>. Acesso em - 04/01/2016.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – online – endereço eletrônico: <<http://www.inpe.br/climaespacial/>>. Acessado em: janeiro de 2015.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.

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

KOMJATHY, A. Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System. 1997. 248 f. Ph.D. dissertation – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n° 188, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.

KUNOW, H., CROOKER, N. U., LINKER, J. A., SCHWENN, R., Von STEIGER, R., Coronal Mass Ejections, Berlin, Springer, 2007.

LANGLEY, R. B. What's in Store for the Next Solar Maximum?. By Anna B.O. Jensen and Cathryn Mitchell. GPS World – Innovation: GNSS and the Ionosphere, 2011. <<http://gpsworld.com/innovation-gnss-and-ionosphere-11036/>>Acessoem Jan. 2015.

LANGLEY, R. B. A Look at High-Latitude and Equatorial Ionospheric Disturbances of GPS Signals. By Yu Jiao, Yu (Jade) Morton, Steve Taylor, and WouterPelgrum. GPS World – Innovation: Scintillating Statistics, 2014. <<http://gpsworld.com/innovation-scintillating-statistics/>>AcessoemDez. 2014.

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

LIAO, X. Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network. 2000. 120 f. M.Sc. dissertation – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report nº 20143, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

LIRA, S.A. Análise de Correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. 2004. 209f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós – Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia da UFPR, Curitiba.

LIU, Z. Ionosphere tomographic modelling and applications using global positioning system (GPS) measurements. PhD Thesis – Department of Geomatics Engineering, UCGE Report no 20198, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canadá, 2004. 304p.

MAREL, H. van der. Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. In: ION GPS 1998, Nashville, Tennessee. **Proceedings...** 1998.

MARQUES, H. A. PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS. 2012. 245f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T. Avaliação de Funções para Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T. Influência de Diferentes Condições da Ionosfera no Posicionamento por Ponto com GPS: Avaliação na Região Brasileira. 2007. 263p Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Correção ionosférica utilizando o modelo de Klobuchar e o regional da ionosfera: avaliação da performance no posicionamento por ponto. *Série em Ciências Geodésicas*. Curitiba: UFPR, 2002. vol.2, p.20–40.

MCNAMARA, L. F. The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding. Flórida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MENDONÇA, M. A. M. Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS. 2013. Dissertação (Mestrado)–Programa de Pós–Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

MOLDWIN, M. An Introduction to Space Weather, 3 Ed., New York: Cambridge Press, 2008.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MONTENBRUCK O., HAUSCHILD A., STEIGENBERGER P. Differential Code Bias Estimation using Multi–GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. ION International Technical Meeting, 26–28 Jan. 2014, San Diego (2014).

MUELLA, M. T. A. H. Morfologia e Dinâmica das Irregularidades Ionosféricas de Pequena Escala e Imageamento Ionosférico por GPS. 2008. Tese (Doutorado) – Programa de Pós–Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

NASON, G. P. Wavelet Methods in Statistics with R. Springer, New York, 2008.

NASON, G. P.; SILVERMAN, B. W. The stationary wavelet transform and some statistical applications. In *Lecture Notes in Statistics*, n. 103, Springer-Verlag, 1995, 281–299.

OLIVEIRA, A. B. V. Uso do GPS para o estudo da Anomalia Equatorial. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2003. 167p.

OLIVEIRA, A. M; PAULA, E. R.; PERRELLA, W. J.; RODRIGUES, F. da S. On the distribution of GPS signal amplitudes during low–latitude ionospheric scintillation. *GPS Solutions* (Heidelberg), v. 10, p. 1–12, 2012.

ORTEGA, M. C; ALVES, D. B. M; AGUIAR, C. R. Análise do Desempenho dos Mapas Ionosféricos no Posicionamento Baseado em Redes. XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2014

OS–SIS–ICD. European GNSS (Galileo) Open Service: Signal in Space Interface Control Document, 2010. 196 f., European Union, set. 2010.

PROL, F. S. Tomografia da ionosfera a partir do GNSS e Técnicas algébricas: estudo de caso para a Região brasileira. 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

RADICELLA, S. M. The NeQuick Model Genesis, Uses and Evolution. In: *Annals of Geophysics*, vol. 52, n. ¾, p. 417–422, jun./aug. 2009.

RODRIGUES, F. S. R. Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 151p.

ROSCH, A.; SCHMIDBAUER, R. WaveletComp: A guided tour through the R– package. Versão 17 de dezembro de 2014. Disponível em <http://www.hs-stat.com/projects/WaveletComp/WaveletComp_guided_tour.pdf>. Acesso em 20/01/2016

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A. Transequatorial F–region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, v. 62, n. 15, 1337–1383, Oct. 2000.

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, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre 2008.

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

SEEBER, G. Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications. Berlin–New York: Walter de Gruyter, 2003

SILVA, H. R. Desempenho do RTK em Rede Sob Efeito da Cintilação Ionosférica. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

SKONE, S. Wide Area Ionosphere Modeling at Low Latitudes – Specifications and Limitations. In: 13TH International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation – ION GPS–2000 – CD ROM, Salt Lake City, Utha, Sept. 19–22, 2000.

SOKOLOVSKIY, S. V.; SCHREINER, W. S; ZENG; Z.; HUNT, D. C.; KUO, Y.H; MEEHAN, T.K; STECHESON, T. W; MANNUCCI, A. J. Use of the L2C signal for inversions of GPS radio occultation data in the neutral atmosphere. *GPS Solut* (2014) 18:405–416. DOI 10.1007/s10291–013–0340–x.

TIWARI, R. et al. WBMod assisted PLL GPS software receiver for mitigating scintillation effect in high latitude region. In: General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. Istanbul, Turkey: [s.n.], 2011. p. 1-4

VAN DIERENDONK, A. J. Measuring ionospheric scintillation effects from GPS signals. ION 59th Annual Meeting. Albuquerque, New Mexico, 11–13, p. 391–396. Proceedings... 2001.

VANI, B. Análise da Cintilação Ionosférica no Brasil empregando GNSS e Técnicas de Visualização de Dados. 2013.139f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

WALTER, T. et al. Effect of ionospheric scintillations on GNSS: A white paper. SBAS Ionospheric Working Group, 2010.

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

YAMASHITA, C. S. Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. 7