

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA

INVESTIGAÇÃO DA USABILIDADE DO GBAS NO BRASIL



Tese de Doutorado



VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA

INVESTIGAÇÃO DA USABILIDADE DO GBAS NO BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP, para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

Orientador:
Dr. Paulo de Oliveira Camargo

Coorientador:
Dr. João Francisco Galera Monico

P436i Pereira, Vinícius Amadeu Stuani
 Investigação da usabilidade do GBAS no Brasil / Vinícius
 Amadeu Stuani Pereira. -- Presidente Prudente, 2018
 305 p.

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
 Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
 Orientador: Paulo de Oliveira Camargo
 Coorientador: João Francisco Galera Monico

 1. Modelo de Risco Ionosférico. 2. GBAS. 3. Irregularidades
 Ionosféricas. 4. GNSS. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: *INVESTIGAÇÃO DA USABILIDADE DO GBAS NO BRASIL*

AUTOR: VINICIUS AMADEU STUANI PEREIRA

ORIENTADOR: PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

COORIENTADOR: JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Dr. JONAS RODRIGUES DE SOUZA
Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. EMANOEL PAIVA DE OLIVEIRA COSTA
Rio de Janeiro / Pontifícia Universidade Católica

Prof. Dr. MILTON HIROKAZU SHIMABUKURO
Departamento de Matemática e Computação / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. CLAUDINEI RODRIGUES DE AGUIAR
Campus Apucarana / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Presidente Prudente, 13 de setembro de 2018.

DADOS CURRICULARES

VINÍCIUS AMADEU STUANI PEREIRA

Nascimento	10/10/1989 – Presidente Prudente/SP
Filiação	Salvador Roberval Pereira Simoni Aparecida Stuani Pereira
2008 – 2012	Curso de Graduação Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP
2013 – 2015	Curso de Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP
2015 – 2018	Curso de Pós-Graduação Doutorado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP

DEDICATÓRIA

Ao meu querido Vô Agenor (sempre presente), patriarca e quem sempre quis ter um neto doutor.

À minha esposa Izabela e ao meu filho Amadeu, família que tanto amo nessa vida.

Aos meus amados pais Salvador e Simoni, pelo apoio, atenção e segurança que me transmitiram durante a jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por tudo que conquistei até o presente, mas peço a Ele que me dê sabedoria para que possa conquistar muito mais.

Agradeço ao meu orientador, amigo e padrinho Paulo de Oliveira Camargo, que há mais de oito anos pesquisando juntos pude aprender muito sobre ela, a Ionosfera, bem como vários outros assuntos, não necessariamente relacionados ao meio acadêmico, mas sim sobre a vida em si. O meu sincero muito obrigado.

Ao meu coorientador João Francisco Galera Monico, pelo seu conhecimento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) único, pelos ensinamentos, críticas, dicas e por acreditar na minha capacidade em momentos importantes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea” (INCT GNSS-NavAer, processos CNPq n° 465648/2014-2, FAPESP n° 2017/50115-0 e CAPES n° 88887.137186/2017-00), por proporcionar ambientes e ferramentas de qualidade para a realização dos estudos.

As agências de fomento à pesquisa CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo n° 2015/20522-7), pelos apoios financeiros durante o desenvolvimento do projeto.

Ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em especial a Sonia Maria Alves Costa (Coordenação de Geodésia), aos projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric-Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*), ao ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo), em especial ao Cap. Eng. Leonardo Marini Pereira, a rede LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*), ao IGS (*International GNSS Service*) e ao LGE (Laboratório de Geodésia Espacial) pelo fornecimento dos dados GNSS das redes ativas, sem os quais não seria possível a realização da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora: Dr. Jonas Rodrigues de Souza/INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), Dr. Emanuel Paiva de Oliveira Costa/PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro), Dr. Milton Hirokazu

Shimabukuro/UNESP e Dr. Claudinei Rodrigues de Aguiar/UTFPR-Apucarana (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus de Apucarana/PR).

Faço também um agradecimento especial ao engenheiro agrônomo gaúcho José Luiz Azambuja, pelos raros e imprescindíveis dados GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) dos anos 2000, 2001 e 2002.

Aos membros do GEGE (Grupo de Estudos em Geodésia Espacial), pelas sugestões e comentários.

Aos amigos Ítalo Tsuchiya, Bruno César Vani, Fabrício dos Santos Prol, Rogério Takeshi Oyama, Paulo Sérgio de Oliveira Júnior, Gabriel Oliveira Jerez e Renan Furlan de Oliveira, que me ajudaram muito para que essa tese tornasse realidade.

Aos demais amigos e professores da Pós-Graduação e todos os funcionários da UNESP, que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

Um agradecimento especial aos meus pais, Salvador e Simoni, irmãos Fernanda e Rodrigo, e avó Dalvina, base familiar indispensável para a formação de um ser humano.

Por fim, mas com muito amor e carinho, gostaria de agradecer a minha esposa Izabela, que sempre esteve ao meu lado durante todo esse período de graduação e pós-graduação, me incentivando, passando segurança, confiança e, sobretudo, cuidando do nosso pequeno Amadeu.

EPÍGRAFE

“A sorte favorece a mente bem preparada”

Louis Pasteur

RESUMO

Dentre os métodos de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) utilizados pela aviação no suporte das fases de aproximação e pouso preciso de aeronaves, destacam-se o SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) e o GBAS (*Ground-Based Augmentation System*). O GBAS tem a capacidade de corrigir a maioria dos erros envolvidos na pseudodistância a partir do DGNSS (*Differential GNSS*), desde que a camada ionosférica apresente um comportamento não perturbado na região do aeroporto. Entretanto, dependendo do fluxo de ionização solar, da atividade geomagnética, do ciclo de manchas solares, do ângulo zenital do Sol e da localização geográfica, a ionosfera pode sofrer fortes perturbações, proporcionando uma ameaça à integridade do GBAS, uma vez que podem ser diferentes os efeitos ionosféricos em pequenas distâncias. Assim, investigações dos erros sistemáticos devido à camada ionosférica no GBAS tem sido objeto de estudos há alguns anos. Nesse sentido, modelos de risco ionosférico, que visam determinar a máxima decorrelação ionosférica espacial existente entre a estação GBAS e a aeronave que se aproxima num aeroporto, foram desenvolvidos ou avaliados, principalmente para o hemisfério norte, mais precisamente para o território norte-americano, onde se destaca o *CONUS (Conterminous United States) Threat Model*. Nessa área o comportamento da ionosfera é mais estável em comparação com o observado sobre o Brasil, localizado na região ionosférica equatorial e de baixas latitudes, que apresenta a ocorrência da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), bolhas ionosféricas, irregularidades ionosféricas, cintilação ionosférica e Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). A implantação de um GBAS no Brasil, por meio do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), despertou o interesse de seu uso com segurança. Sendo assim, a pesquisa propôs investigar a aplicabilidade do modelo CONUS de risco ionosférico para GBAS no território brasileiro, utilizando o método dos pares de estações (*station-pair method*), além de estimar os parâmetros para os principais aeroportos internacionais do Brasil, considerando a variação sazonal, bem como investigar os benefícios quanto ao uso dos sinais GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), Galileo e da portadora L5 do GPS (*Global Positioning System*) no modelo. Para isso, foram utilizados dados GNSS de várias redes ativas entre os anos de 2000 e 2016, bem como dados do GBAS instalado no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão). Para a determinação dos parâmetros do modelo de risco e do parâmetro de integridade σ_{vig} (*vertical ionospheric gradient sigma*), esse último utilizado para estimar os níveis de proteção horizontal e vertical da aeronave, foi implementado um sistema denominado MoR_Ion. Os parâmetros do modelo CONUS estimados para o Brasil, utilizando sinais GPS para a combinação de portadoras L1/L2, mostraram que é inviável o uso de um GBAS considerando todo o território nacional. Uma alternativa foi estimativa local e temporal para os aeroportos de interesse. Valores obtidos indicaram que o GBAS pode, provavelmente, ser utilizado nos aeroportos internacionais de São Paulo/SP (Cumbica), Rio de Janeiro/RJ (Galeão), Brasília/DF (Presidente Juscelino Kubitschek) e Recife/PE (Gilberto Freyre) com algumas restrições quanto à estação do ano, hora do dia e elevação dos satélites. Já para o aeroporto internacional de Porto Alegre/RS (Salgado Filho) é o único, entre os analisados, em que nenhuma restrição à instalação do GBAS no local foi identificada a partir do conjunto de dados processados. Resultados empregando os sinais GPS e Galileo, para a combinação L1/L5, apresentaram ser melhores que os da combinação L1/L2. Já em relação ao GLONASS, verificou-se que há uma semelhança com os resultados do GPS. A determinação do σ_{vig} em tempo real para cada satélite disponível se apresentou como uma alternativa interessante, uma vez que transmite para a aeronave a real condição ionosférica no momento da aproximação e pouso, ao contrário da atual configuração do GBAS de transmitir um valor fixo de σ_{vig} que,

teoricamente, contempla todas as possíveis perturbações ionosféricas. Estimativas de níveis de proteção para aproximação no Galeão indicaram que há a possibilidade de se realizar um procedimento CAT-I, utilizando satélites GPS ou GLONASS (combinação L1/L2), desde que sejam aplicadas restrições local-temporais previamente estabelecidas. Verificou-se, também, que a utilização dos satélites GLONASS em concomitância com o GPS possibilita a obtenção de valores que atendem aos limiares para um pouso CAT-III, uma vez que uma maior quantidade de satélites e, conseqüentemente, uma melhor configuração geométrica, é disponibilizada. Um estudo de caso utilizando o *time-step method* para a região do aeroporto de São José dos Campos/SP, onde se encontram cinco estações em um raio de 10 km, indicou que gradientes desse método podem ser empregados na estimativa dos valores dos parâmetros. Entretanto, tal método tem pouca semelhança com a arquitetura de uma estação GBAS e uma aeronave que se aproxima e, adicionalmente, não soluciona a decorrelação temporal. Por fim, um método alternativo que pode indicar a realização ou não do pouso consiste no monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real na região circundante de um determinado aeroporto. Experimento realizado em tempo real, mas utilizando dados GPS e GLONASS de março de 2014 (próximo ao pico do ciclo solar 24), mostrou fortes irregularidades para a região do Galeão, com a frente ionosférica se deslocando de sudoeste a nordeste. Assim, uma medida que pode ser empregada para estimar os níveis de proteção consiste em não utilizar os sinais dos satélites que atravessam tais irregularidades.

Palavras-chave: Modelo de Risco Ionosférico. GBAS. Irregularidades Ionosféricas. GNSS.

ABSTRACT

Among the methods of GNSS (Global Navigation Satellite System) positioning used by the aviation in the support of the phases of approach and precise landing of aircraft, stand out the SBAS (Satellite-Based Augmentation System) and the GBAS (Ground-Based Augmentation System). GBAS has the ability to correct most of the errors involved in pseudorange from DGNSS (Differential GNSS), provided that the ionospheric layer exhibits undisturbed behavior in the airport region. However, depending on the flow of solar ionization, geomagnetic activity, sunspot cycle, zenith angle of the sun and geographic location, the ionosphere can suffer severe disturbances, posing a threat to the integrity of the GBAS, since the ionospheric effects may be different at small distances. Thus, investigations of systematic errors due to the ionospheric layer in GBAS have been the subject of studies for some years. In this sense, ionospheric threat models, which seek to determine the maximum existing spatial ionospheric decorrelation between the GBAS station and the aircraft approaching an airport, have been developed or evaluated, especially for the northern hemisphere, more precisely to the US territory, which highlights the CONUS (Conterminous United States) Threat Model. In this area, the ionosphere behavior is more stable compared to that observed in Brazil, located in the equatorial and low latitude ionospheric region, which presents the occurrence of Equatorial Ionization Anomaly (EIA), ionospheric bubbles, ionospheric irregularities, ionospheric scintillation and South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA). The implementation of a GBAS in Brazil, through the Department of Airspace Control (DECEA), aroused the interest of its use with safety. Therefore, the research proposed to investigate the applicability of the CONUS Threat Model to GBAS in the Brazilian territory, using the station-pair method, besides estimating the parameters for the main international airports of Brazil, considering the seasonal variation, as well as investigating the benefits of using the GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya System*), Galileo and GPS (Global Positioning System) L5 carrier in the model. For this purpose, GNSS data from several active networks were used between 2000 and 2016, as well as data from GBAS installed at Rio de Janeiro International Airport (Galeão). For the determination of the parameters of the threat model and the σ_{vig} (vertical ionospheric gradient sigma) integrity parameter, the latter used to estimate the aircraft horizontal and vertical protection levels, a system called MoR_Ion was implemented. The parameters of the CONUS model estimated for Brazil, using GPS signals for the combination of L1/L2 carriers, showed that it is impracticable to use a GBAS considering the entire national territory. An alternative was a local and temporal estimate for the airports of interest. The values obtained indicate that the GBAS can probably be used in the international airports of São Paulo/SP (Cumbica), Rio de Janeiro/RJ (Galeão), Brasília/DF (President Juscelino Kubitschek) and Recife/PE (Gilberto Freyre) with some restrictions on the season, time of day and satellite elevation. At the international airport of Porto Alegre/RS (Salgado Filho) it is the only one, among the analyzed ones, in which no restriction to the installation of the GBAS in the place was identified from the data set processed. Results using the GPS and Galileo signals for the L1/L5 combination were better than the L1/L2 combination. Regarding GLONASS, it was found that there is a similarity with the GPS results. The determination of the real time σ_{vig} for each available satellite was presented as an interesting alternative, since it transmits to the aircraft the actual ionospheric condition at the time of approach and landing, unlike the current GBAS configuration of transmitting a fixed value of σ_{vig} which theoretically covers all possible ionospheric disturbances. Estimates of protection levels for approach in Galeão indicated that there is the possibility of performing a CAT-I procedure, using GPS or GLONASS satellites (L1/L2 combination), provided that previously established local-temporal restrictions are applied. It was also verified that the use

of GLONASS satellites in concomitance with GPS allows obtaining values that meet the thresholds for a CAT-III landing, since a larger number of satellites and, consequently, a better geometric configuration, is made available. A case study using the time-step method for the airport region of São José dos Campos/SP, where five stations are located within a 10 km radius, indicated that gradients of this method can be used to estimate the parameter values. However, this method has little resemblance to the architecture of a GBAS station and an aircraft approaching and additionally does not solve the temporal decorrelation. Finally, an alternative method that may indicate whether or not the landing is carried out is to monitor ionospheric irregularities in real time in the surrounding region of a given airport. A real-time experiment using GPS and GLONASS data from March 2014 (near the peak of the solar cycle 24) showed strong irregularities for the Galeão region, with the ionospheric front moving from southwest to northeast. Thus, one way that can be used to estimate protection levels is to not use satellite signals that cross such irregularities.

Key-words: Ionospheric Threat Model. GBAS. Ionospheric Irregularities. GNSS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito do DGNSS.	51
Figura 2 – Regiões do nível de proteção e do limite de alerta na navegação de aeronaves.	53
Figura 3 – Conceitos de acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade em um plano bidimensional.	57
Figura 4 – Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO para algumas fases de voo.	58
Figura 5 – Arquitetura de um sistema SBAS.	62
Figura 6 – Áreas de cobertura e de serviço do WAAS, EGNOS e MSAS.	65
Figura 7 – Arquitetura de um sistema GBAS.	67
Figura 8 – Localização da estação GBAS e das quatro estações de referência no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão).	69
Figura 9 – Precisão vertical obtida pela estação GBAS instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com uso somente do GPS e com as correções do GBAS, para 31/08/2011.	69
Figura 10 – Precisão vertical obtida pela estação GBAS instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com uso somente do GPS e com as correções do GBAS, para 06/10/2011.	70
Figura 11 – Precisão vertical obtida pela estação GBAS instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com uso somente do GPS e com as correções do GBAS, para 13/11/2011.	70
Figura 12 – Localização das estações das redes ativas que disponibilizam dados pós-processados (RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, LISN, IGS e ICEA).	72
Figura 13 – Localização das estações das redes ativas que disponibilizam dados em tempo real (RBMC-IP e GNSS-SP).	72
Figura 14 – Estratificação da atmosfera terrestre.	75
Figura 15 – Processo de fotoionização para um átomo de oxigênio.	76
Figura 16 – Densidade média de elétrons durante o dia e a noite nas camadas ionosféricas D, E e F.	78
Figura 17 – Número de manchas solares S_n desde 1700 até 2 de julho de 2018.	81
Figura 18 – Número de manchas solares S_n do fim do ciclo 23 e do atual ciclo 24.	82
Figura 19 – Influência do vento solar no campo geomagnético.	82
Figura 20 – Campo geomagnético total para o ano de 2005, sendo o contorno de 28000 nT a região da AMAS.	83
Figura 21 – Probabilidade de ocorrência de dias geomagneticamente perturbados.	84
Figura 22 – Regiões geográficas da ionosfera.	86
Figura 23 – Mapas globais de TEC produzidos pelo CODE para 3 de julho de 2012.	88
Figura 24 – Ionogramas de ionosonda digital em Palmas/TO, a) sem a ocorrência de espalhamento e b) com a ocorrência de espalhamento.	89

Figura 25 – Imagens do imageador <i>all-sky</i> em Palmas/TO, a) sem a ocorrência de bolhas de plasma e b) com a ocorrência de bolhas de plasma.	89
Figura 26 – Flutuações de fase provenientes de dados de receptor GNSS em Palmas/TO, a) com a ocorrência de flutuações e b) sem a ocorrência de flutuações.	90
Figura 27 – a) Perfil vertical ionosférico típico para a região equatorial. b) Analogia do perfil mostrado em a) com o caso de um fluido denso sendo suportado por um fluido de menor densidade. c) Ilustração da evolução da instabilidade hidrodinâmica R-T.	91
Figura 28 – Evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.	92
Figura 29 – Mapas do índice f_p (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.	94
Figura 30 – Mapas do índice ROTI (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.	96
Figura 31 – Morfologia global das cintilações durante anos de atividade solar a) máxima e b) mínima.	97
Figura 32 – Mapas do índice σ_ϕ (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.	101
Figura 33 – Representação de uma frente ionosférica e os parâmetros do modelo de risco ionosférico.	113
Figura 34 – Pior configuração para o deslocamento de uma frente ionosférica.	114
Figura 35 – Deslocamento de uma frente ionosférica entre duas estações de referência.	116
Figura 36 – Ângulo de direção de deslocamento do IPP.	117
Figura 37 – Determinação do gradiente ionosférico pelo <i>station-pair method</i>	118
Figura 38 – Determinação do gradiente ionosférico pelo <i>time-step method</i>	120
Figura 39 – Procedimento geral para a estimativa dos parâmetros do modelo CONUS de risco ionosférico.	122
Figura 40 – Estações utilizadas no desenvolvimento do <i>CONUS Threat Model</i>	123
Figura 41 – Estações utilizadas na avaliação do <i>Korean Threat Model</i>	123
Figura 42 – Pares de estações utilizados na avaliação do <i>Korean Threat Model</i>	126
Figura 43 – Exemplo de resultados de atraso ionosférico, gradiente ionosférico e elevação para um satélite GPS de um par de estações do <i>Korean Threat Model</i>	127
Figura 44 – Exemplo de resultados de gradiente de dupla frequência e de gradiente CMC para um satélite GPS de um par de estações do <i>Korean Threat Model</i>	129
Figura 45 – Exemplo de resultados de atraso ionosférico inclinado em L1 obtido a partir da combinação L1/L2, CMC e gradiente ionosférico CMC para um satélite GPS de quatro estações do <i>Korean Threat Model</i>	131
Figura 46 – Relação do <i>Korean Threat Model</i> e <i>CONUS Threat Model</i>	132
Figura 47 – Função densidade de probabilidade de gradientes ionosféricos verticais normalizados da região dos Estados Unidos para o dia 2 de julho de 2000.	134
Figura 48 – Valores de σ_{vig_infla} do <i>CONUS Threat Model</i> referentes aos dias ionosféricos nominais e anômalos.	135
Figura 49 – Limites dos gradientes ionosféricos do <i>CONUS Threat Model</i>	136

Figura 50 – Gradientes ionosféricos obtidos pelo <i>Low Latitude Threat Model</i>	136
Figura 51 – Limites dos gradientes ionosféricos do <i>German Threat Model</i>	139
Figura 52 – Fluxograma do MoR_Ion_PP.	142
Figura 53 – Localização dos aeroportos da rede INFRAERO.	144
Figura 54 – Localização dos aeroportos da rede DAESP.....	144
Figura 55 – Estrutura de organização dos dados GNSS utilizados na avaliação do modelo CONUS de risco ionosférico.	146
Figura 56 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS em L1 obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes à estação SJCE para o dia 06/03/2016.	153
Figura 57 – Determinação dos instantes de máximo e de mínimo do atraso ionosférico para o satélite G25 e aplicação de restrições para o satélite G01.	155
Figura 58 – Gradientes ionosféricos para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes ao par SJCE-SJCU para o dia 06/03/2016.	156
Figura 59 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes à estação SJCE para o dia 06/03/2016.	158
Figura 60 – Gradientes ionosféricos iniciais para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes ao par SJCE-SJCU para o dia 06/03/2016.	160
Figura 61 – Tipos de configurações de pares de estações.	161
Figura 62 – Gradientes ionosféricos finais e não validados para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes ao par SJCE-SJCU para o dia 06/03/2016.	162
Figura 63 – Trecho inicial do arquivo “2016_066_gIf_vf_GPS_L1L2.txt” referente ao caso do aeroporto SBSJ.	163
Figura 64 – Gráficos de DCB do receptor da estação SJCE em função das datas de processamento, para as combinações entre as portadoras GPS L1/L2 e L1/L5, GLONASS L1/L2 e Galileo L1/L5.	164
Figura 65 – Gráficos de DCB do receptor da estação VICO em função das datas de processamento, para as combinações entre as portadoras GPS L1/L2 e GLONASS L1/L2.	165
Figura 66 – Atrasos ionosféricos, gradientes ionosféricos e elevação do satélite G08 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.	167
Figura 67 – Gradientes ionosféricos do satélite G08 obtidos com medidas de fase a partir da combinação L1/L2 e com medidas CMC na portadora L1, referentes ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.....	168
Figura 68 – ROT e índices f_p , I_{ROT} e ROTI do satélite G08 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.	168
Figura 69 – Índice S4 do satélite G08 obtidos a partir da portadora L1, referente às estações SJCE e SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.	169

Figura 70 – Mapas dos índices f_p (23h45-24h TU), F_p (23h-24h TU), I_{ROT} (23h45-24h TU) e $ROTI$ (23h45-23h50 TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 06/03/2016.	169
Figura 71 – Mapa de atraso ionosférico (23h50 TU) para os satélites GPS obtido a partir da combinação L1/L2, para o dia 06/03/2016.	170
Figura 72 – <i>Skyplot</i> do satélite G08 referente ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.	171
Figura 73 – FDP dos gradientes ionosféricos verticais normalizados para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes aos pares para o caso do aeroporto SBSJ para o dia 06/03/2016.	172
Figura 74 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes aos pares para o caso do aeroporto SBSJ para o dia 06/03/2016.	173
Figura 75 – Fluxograma do MoR_Ion_TR.	174
Figura 76 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBBR para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.	175
Figura 77 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBGL para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.	176
Figura 78 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBGR para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.	176
Figura 79 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBPA para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.	177
Figura 80 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBRF para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.	177
Figura 81 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBBR, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do 19/02/2018.	180
Figura 82 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e $ROTI$ para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações RIOD e VICO para o dia 07/11/2001 (ciclo 23/ápice/verão).	183
Figura 83 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e $ROTI$ para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações BRAZ e VICO para o dia 08/11/2004 (ciclo 23/declínio/verão).	184
Figura 84 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e $ROTI$ para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 14/11/2012 (ciclo 24/ascensão/verão).	185
Figura 85 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e $ROTI$ para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 09/11/2013 (ciclo 24/ápice/verão).	186
Figura 86 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações RIOD e VICO para o dia 07/11/2001 (ciclo 23/ápice/verão).	188
Figura 87 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações BRAZ e VICO para o dia 08/11/2004 (ciclo 23/declínio/verão).	188

Figura 88 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS e GLONASS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 14/11/2012 (ciclo 24/ascensão/verão).....	189
Figura 89 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS e GLONASS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 09/11/2013 (ciclo 24/ápice/verão).	189
Figura 90 – Mapas do índice ROTI (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 09/11/2013 (ciclo 24/ápice/verão).	191
Figura 91 – Pares de estações para a estimativa geral dos parâmetros do modelo, referentes aos dias 20/03/2001 e 21/06/2016.	192
Figura 92 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	193
Figura 93 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	193
Figura 94 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	193
Figura 95 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	194
Figura 96 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	194
Figura 97 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	194
Figura 98 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	194
Figura 99 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	195
Figura 100 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	195
Figura 101 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	195
Figura 102 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	195

Figura 103 – Mapas de direção e velocidade da frente para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.	198
Figura 104 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.....	200
Figura 105 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	201
Figura 106 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	202
Figura 107 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	203
Figura 108 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2 do bloco 200-250 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 07/11/2001.	204
Figura 109 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2 dos blocos 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.	205
Figura 110 – Pares de estações para a estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, referentes aos dias 20/03/2001 e 21/06/2016.	207
Figura 111 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	208
Figura 112 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.....	209
Figura 113 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.....	210
Figura 114 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.....	211
Figura 115 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.....	212

Figura 116 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	213
Figura 117 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	214
Figura 118 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	215
Figura 119 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	216
Figura 120 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	217
Figura 121 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	218
Figura 122 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2 dos blocos 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km, referentes aos pares da estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR para o dia 01/03/2014.	219
Figura 123 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGL, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	221
Figura 124 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGL, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	222
Figura 125 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBBR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	224
Figura 126 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBBR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	225

Figura 127 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBPA, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	227
Figura 128 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBPA, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	228
Figura 129 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBRF, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	230
Figura 130 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBRF, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.	231
Figura 131 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	233
Figura 132 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referente à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	233
Figura 133 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	233
Figura 134 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	234
Figura 135 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	234
Figura 136 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS combinação L1/L5.	234
Figura 137 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	234
Figura 138 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	235
Figura 139 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	235
Figura 140 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	235

Figura 141 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	235
Figura 142 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L5 dos blocos 0-50 km e 100-150 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.	238
Figura 143 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.	239
Figura 144 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referente à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	239
Figura 145 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	239
Figura 146 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	239
Figura 147 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	240
Figura 148 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.	240
Figura 149 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	240
Figura 150 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	240
Figura 151 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	241
Figura 152 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.	241
Figura 153 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.	241
Figura 154 – Mapas de direção e velocidade da frente para os satélites GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.	242

Figura 155 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2 dos blocos 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.....	243
Figura 156 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.	244
Figura 157 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referente à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	244
Figura 158 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	245
Figura 159 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	245
Figura 160 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	245
Figura 161 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.	245
Figura 162 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	246
Figura 163 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	246
Figura 164 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	246
Figura 165 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.....	246
Figura 166 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.	247
Figura 167 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites Galileo obtidos a partir da combinação L1/L5 dos blocos 0-50 km e 100-150 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.....	248
Figura 168 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 28/02/2018.	250
Figura 169 – Mensagem GBAS Tipo 1 da estação do aeroporto SBGL para às 20h50 TU do dia 28/02/2018.	251

Figura 170 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBGR, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 28/02/2018.	253
Figura 171 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBBR, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 28/02/2018.	253
Figura 172 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBPA, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 28/02/2018.	254
Figura 173 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBRF, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 28/02/2018.	254
Figura 174 – Mapas do índice I_{ROT} (0h-3h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.	255
Figura 175 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para o instante 1h 51min 45s TU do dia 01/03/2014.	256
Figura 176 – Trajetória dos últimos 250 km do voo TAM/JJ3839, realizado no dia 12/03/2018, partindo do aeroporto SBRF e com destino ao aeroporto SBGL.	258
Figura 177 – Trajetória tridimensional dos últimos 250 km do voo TAM/JJ3839, realizado no dia 12/03/2018, partindo do aeroporto SBRF e com destino ao aeroporto SBGL.	258
Figura 178 – Tela do SBGL_PL referente ao instante 23h 20min 30s TU do dia 23/04/2018.	260
Figura 179 – Distância, altitude, azimute e velocidade da aeronave durante os últimos 250 km do voo TAM/JJ3839, com destino ao aeroporto SBGL.	261
Figura 180 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e aplicação ou não do <i>Screening</i>	262
Figura 181 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} sem distinção de distância (geral) e aplicação ou não do <i>Screening</i>	263
Figura 182 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-II no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e aplicação ou não do <i>Screening</i>	264
Figura 183 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-II no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} sem distinção de distância (geral) e aplicação ou não do <i>Screening</i>	265
Figura 184 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e aplicação ou não do <i>Screening</i>	266

Figura 185 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} sem distinção de distância (geral) e aplicação ou não do <i>Screening</i>	267
Figura 186 – Elevação e <i>skyplot</i> dos satélites GPS e GLONASS disponíveis para a aproximação e pouso preciso no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018.	268
Figura 187 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-B, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e sem distinção de distância (geral), e sem aplicação do <i>Screening</i>	270
Figura 188 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 10/05/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e sem distinção de distância (geral), e sem aplicação do <i>Screening</i>	271
Figura 189 – Localização das estações utilizadas na estimativa de gradientes ionosféricos pelo <i>time-step method</i> para a região do aeroporto SBSJ.	272
Figura 190 – Gradientes ionosféricos para os satélites GPS obtidos a partir das combinações de fase em L1/L2, referentes às estações ICEA, LSJK, SJCE, SJCU e SJSP para o dia 06/03/2016.	273
Figura 191 – Gradientes ionosféricos para os satélites GPS obtidos a partir das combinações de fase em L1/L5, referentes às estações ICEA, SJCE e SJCU para o dia 06/03/2016.	274
Figura 192 – Gradientes ionosféricos para os satélites GLONASS obtidos a partir das combinações de fase em L1/L2, referentes às estações ICEA, SJCE, SJCU e SJSP para o dia 06/03/2016.	274
Figura 193 – Gradientes ionosféricos para os satélites Galileo obtidos a partir das combinações de fase em L1/L5, referentes às estações ICEA, SJCE e SJCU para o dia 06/03/2016.	275
Figura 194 – Gradientes ionosféricos dos satélites G08 (L1/L2 e L1/L5), R09 (L1/L2) e E22 (L1/L5), referentes às estações para o caso do aeroporto SBSJ para o dia 06/03/2016.	275
Figura 195 – Estações da RBMC-IP utilizadas no monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real para a região do aeroporto SBGL.	277
Figura 196 – Mapas do índice ROTI (13h 21min 15s – 13h 25min 30s TU) capturadas em tempo real referente à região do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 27/04/2018.....	278
Figura 197 – Mapas do índice ROTI (23h 02min 00s – 23h 05min 15s TU) capturadas em tempo real referente à região do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 27/04/2018.....	279
Figura 198 – Mapas do índice ROTI (23h 27min 45s – 23h 32min 00s TU) capturadas em tempo real referente à região do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.....	280

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número do canal k para cada uma das posições orbitais do GLONASS.	46
Tabela 2 – Fontes e erros sistemáticos envolvidos no GNSS.	49
Tabela 3 – Valores nominais dos principais erros no posicionamento absoluto GPS e os respectivos valores dos erros residuais no DGNSS.	50
Tabela 4 – Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO para cada fase de voo.....	59
Tabela 5 – Potencial de operação dos Sistemas de Aumento do GNSS.	60
Tabela 6 – Tipos de serviços SBAS disponíveis e respectivas correções fornecidas e o mais alto nível de operação de voo atendido.	63
Tabela 7 – Classificação de uma tempestade geomagnética em função do índice D_{st}	85
Tabela 8 – Classificação da atividade geomagnética em função do índice K_p	85
Tabela 9 – Valores de K_{ffmd} para as aproximações precisas CAT-I, II e III.....	108
Tabela 10 – Valores dos parâmetros a_0 , a_1 e E_c em função dos designadores de acurácia da estação de referência.	109
Tabela 11 – Valores dos parâmetros a_0 , a_1 , a_2 e E_0 para os GAD-A, GAD-B e GAD-C.....	112
Tabela 12 – Variação típica dos parâmetros de um modelo de risco ionosférico.	113
Tabela 13 – Limites e variações dos parâmetros do <i>CONUS Threat Model</i>	135
Tabela 14 – Maiores gradientes ionosféricos obtidos pelo <i>Low Latitude Threat Model</i>	137
Tabela 15 – Limites dos gradientes ionosféricos do <i>German Threat Model</i>	139
Tabela 16 – Distribuição das datas para a estimativa dos parâmetros do modelo de risco ionosférico de acordo com a abordagem diferenciada de delimitação das estações do ano.	145
Tabela 17 – Comparação dos DCB estimados dos receptores das estações IGS disponíveis para o dia 06/03/2016 com os respectivos valores contidos no arquivo IONEX do CODE.	151
Tabela 18 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	196
Tabela 19 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	196
Tabela 20 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	236
Tabela 21 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.	236
Tabela 22 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.....	242

Tabela 23 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.	242
Tabela 24 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.	247
Tabela 25 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.	247
Tabela 26 – DCB médios dos receptores e desvios-padrão referentes às estações para o caso do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 28/02/2018.	249
Tabela 27 – DCB médios dos receptores e desvios-padrão referentes às estações para o caso do aeroporto SBGR, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 28/02/2018.	252
Tabela 28 – Informações do voo utilizado como exemplo para a estimativa dos níveis de proteção para a aproximação e pouso preciso no aeroporto SBGL.	257
Tabela 29 – Prováveis restrições ao uso do GBAS em alguns aeroportos internacionais brasileiros, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.	284

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAD	– <i>Airborne Accuracy Designator</i>
ABAS	– <i>Aircraft-Based Augmentation System</i>
AIE	– <i>Anomalia de Ionização Equatorial</i>
AL	– <i>Alert Limit</i>
AMAS	– <i>Anomalia Magnética do Atlântico Sul</i>
APV	– <i>Approach with Vertical Guidance</i>
BNC	– <i>BKG NTRIP Client</i>
CALIBRA	– <i>Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil</i>
CAT	– <i>Precision Approach Category</i>
CDMA	– <i>Code Division Multiple Access</i>
CIGALA	– <i>Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America</i>
CMC	– <i>Code Minus Carrier</i>
CNPq	– <i>Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico</i>
CODE	– <i>Centre for Orbit Determination in Europe</i>
CONUS	– <i>Conterminous United States</i>
CORS	– <i>Continuously Operating Reference Stations</i>
C/A	– <i>Coarse/Acquisition</i>
DAESP	– <i>Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo</i>
DCB	– <i>Differential Code Bias</i>
DECEA	– <i>Departamento de Controle do Espaço Aéreo</i>
DFree	– <i>Divergence-Free Smoothing</i>
DGNSS	– <i>Differential GNSS</i>
DH	– <i>Decision Altitude</i>
DM	– <i>Distância Máxima entre as estações para a formação dos pares</i>
DOY	– <i>Day Of Year</i>
D _{st}	– <i>Disturbance Storm-Time</i>
EGNOS	– <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ESF	– <i>Equatorial Spread F</i>
FAA	– <i>US Federal Aviation Administration</i>
FAPESP	– <i>Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo</i>

FCT	– Faculdade de Ciências e Tecnologia
FD	– <i>Fault Detection</i>
FDE	– <i>Fault Detection and Exclusion</i>
FDMA	– <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FDP	– Função Densidade de Probabilidade
f_p	– <i>Phase Fluctuation</i>
GAD	– <i>Ground Accuracy Designator</i>
GAGAN	– <i>GPS Aided GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	– <i>Ground-Based Augmentation System</i>
GLONASS	– <i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS-SP	– Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
GRAS	– <i>Ground-Based Regional Augmentation System</i>
GSA	– <i>European Global Navigation Satellite Systems Agency</i>
HAL	– <i>Horizontal Alert Limit</i>
HPL	– <i>Horizontal Protection Level</i>
IAE	– Instituto de Aeronáutica e Espaço
IATA	– <i>International Air Transport Association</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	– <i>International Civil Aviation Organization</i>
ICEA	– Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IFree	– <i>Ionosphere-Free Smoothing</i>
IGS	– <i>International GNSS Service</i> ou Órbitas IGS Precisas
INCT GNSS-NavAer	– Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea”
INFRAERO	– Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	– <i>Ionosphere Map Exchange Format</i>
IPP	– <i>Ionospheric Pierce Point</i>
ITA	– Instituto Tecnológico de Aeronáutica
ITRF	– <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
K_{ffmd}	– <i>Fault-Free Missed Detection</i>
LAAS	– <i>Local Area Augmentation System</i>

LISN	– <i>Low-Latitude Ionospheric Sensor Network</i>
LPV	– <i>Lateral Precision Approach with Vertical Guidance</i>
MSAS	– <i>MSAT Satellite-Based Augmentation System</i>
NPA	– <i>Non-Precision Approach</i>
NTRIP	– <i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
P	– <i>Precise or Protected Code</i>
PDOP	– <i>Positioning Dilution of Precision</i>
PL	– <i>Protection Level</i>
PRN	– <i>Pseudo Random Noise</i>
QZSS	– <i>Quase-Zenith Satellite System</i>
RAIM	– <i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RBMC	– <i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RBMC-IP	– <i>RBMC em Tempo Real – Internet Protocol</i>
RINEX	– <i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMS	– <i>Root Mean Square</i>
ROT	– <i>Rate of Change of TEC</i>
RTCM SC-104	– <i>Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104</i>
RTK	– <i>Real Time Kinematic</i>
R-T	– <i>Instabilidade Tipo Rayleigh-Taylor</i>
SA	– <i>Selective Availability</i>
SBAS	– <i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SDF	– <i>Sudden Disappearing Filaments</i>
TEC	– <i>Total Electron Content</i>
TECU	– <i>TEC Unit</i>
TEQC	– <i>Translation, Editing and Quality Checking</i>
TU	– <i>Tempo Universal</i>
UNESP	– <i>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”</i>
UTC	– <i>Universal Time Coordinated</i>
VAL	– <i>Vertical Alert Limit</i>
VHF	– <i>Very High Frequency</i>
VIG	– <i>Vertical Ionospheric Gradient</i>
VPL	– <i>Vertical Protection Level</i>
WAAS	– <i>Wide Area Augmentation System</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	33
1.1	Considerações Iniciais	33
1.2	Hipótese	38
1.3	Objetivos Geral e Específicos.....	38
1.4	Justificativa.....	39
1.5	Conteúdo da Tese	41
2	SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE E REDES ATIVAS.....	43
2.1	GPS, GLONASS e Galileo	43
2.1.1	Observáveis GNSS	47
2.1.2	Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis	48
2.2	GNSS e Navegação Aérea	49
2.2.1	DGNSS	50
2.2.2	Navegação de aeronaves.....	53
2.3	Sistemas de Aumento	54
2.3.1	Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO	56
2.3.2	ABAS	60
2.3.3	SBAS	61
2.3.4	GBAS	65
2.3.5	GRAS	71
2.4	Redes Ativas	71
3	IONOSFERA, IRREGULARIDADES E CINTILAÇÕES.....	74
3.1	Fonte Solar de Ionização	74
3.2	Estratificação da Atmosfera Terrestre	75
3.3	Formação e Características da Camada Ionosférica	76
3.4	Conteúdo Total de Elétrons	78
3.4.1	Variações diárias e sazonais	80
3.4.2	Variações com os ciclos solares	81
3.4.3	Variações com a atividade geomagnética.....	82
3.4.4	Regiões geográficas da ionosfera	85
3.5	Irregularidades Ionosféricas e Índices	88
3.6	Cintilação dos Sinais GNSS e Índices	97

4	MODELO DE RISCO IONOSFÉRICO.....	103
4.1	Cálculo dos Níveis de Proteção da Aeronave.....	104
4.1.1	Erro devido à aeronave	108
4.1.2	Erro devido à troposfera	110
4.1.3	Erro devido à ionosfera.....	110
4.1.4	Erro devido à estação.....	111
4.2	Parâmetros do Modelo CONUS de Risco Ionosférico	112
4.3	Métodos de Determinação do Gradiente Ionosférico	118
4.3.1	<i>Station-Pair Method</i>	118
4.3.2	<i>Time-Step Method</i>	119
4.4	Procedimento Geral para a Estimativa dos Parâmetros e Avaliação do Modelo CONUS de Risco Ionosférico	121
4.4.1	Seleção de dados GPS de dupla frequência de redes ativas	122
4.4.2	Estimativa dos atrasos ionosféricos.....	124
4.4.3	Estimativa dos gradientes ionosféricos.....	126
4.4.4	Triagem automática dos gradientes	127
4.4.5	Validação dos gradientes	128
4.4.6	Determinação do limite do gradiente ionosférico e estimativa dos demais parâmetros do modelo.....	131
4.5	Determinação do Desvio-Padrão do Gradiente Ionosférico Vertical	132
4.6	Exemplos de Modelos de Risco Ionosférico Avaliados	135
4.6.1	<i>CONUS Threat Model</i>	135
4.6.2	<i>Low Latitude Threat Model</i>	136
4.6.3	<i>Korean Threat Model</i>	138
4.6.4	<i>German Threat Model</i>	139
5	DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DE RISCO IONOSFÉRICO PARA GBAS NO BRASIL – MoR_Ion	140
5.1	Modalidade – Estimativa dos Parâmetros do Modelo de Risco Ionosférico (Pós-Processado)	142
5.2	Modalidade – Estimativa do Desvio-Padrão do Gradiente Ionosférico Vertical (Tempo Real).....	173
6	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES	181
6.1	Identificação, Delimitação e Intensidade das Irregularidades Ionosféricas para os Ciclos Solares 23 e 24	182
6.2	Estimativa dos Parâmetros do Modelo CONUS de Risco Ionosférico para o Território Brasileiro.....	192
6.3	Estimativa dos Parâmetros Local-Temporais do Modelo CONUS de Risco Ionosférico para Aeroportos Internacionais Brasileiros	206

6.3.1	Aeroporto internacional de São Paulo/SP – “Cumbica” (SBGR)	207
6.3.2	Aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ – “Galeão” (SBGL).....	221
6.3.3	Aeroporto internacional de Brasília/DF – “Pres Juscelino Kubitschek” (SBBR).....	224
6.3.4	Aeroporto internacional de Porto Alegre/RS – “Salgado Filho” (SBPA).....	227
6.3.5	Aeroporto internacional de Recife/PE – “Gilberto Freyre” (SBRF)	230
6.4	Investigação do Uso da Portadora L5 do GPS e dos Sinais GLONASS e Galileo na Estimativa dos Parâmetros do Modelo CONUS de Risco Ionosférico.....	232
6.5	Estimativa do σ_{vig} em Tempo Real para os Aeroportos SBGR, SBGL, SBBR, SBPA e SBRF a Partir de Medidas de Pseudodistância Filtrada pela Fase da Portadora.....	248
6.6	Estimativa dos Níveis de Proteção em Tempo Real para a Aproximação e Pouso Preciso no Aeroporto SBGL a Partir de Dados do GBAS, de Aeronave e do σ_{vig}	257
6.7	Estimativa de Gradientes Ionosféricos a Partir do <i>Time-Step Method</i> para a Região do Aeroporto SBSJ	271
6.8	Monitoramento das Irregularidades Ionosféricas em Tempo Real para a Região do Aeroporto SBGL a Partir dos Sinais GPS e GLONASS	277
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	282
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	289
	APÊNDICE A – Dias Seleccionados para a Avaliação do Modelo CONUS de Risco Ionosférico no Brasil.....	300

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Aplicações que têm como pré-requisito alta acurácia em coordenadas requerem o uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) multifrequência. Entretanto, receptores de frequência simples também são empregados em várias atividades de posicionamento e, principalmente, na navegação aérea, que atualmente utiliza apenas medidas de pseudodistância moduladas pelo código na portadora L1 do GPS (*Global Positioning System*), devido à ausência de garantia de integridade do sinal na portadora L2 para fins de navegação (ICAO, 2013b). Todavia, os sinais GNSS são afetados por diversos erros sistemáticos, entre os quais se destaca a influência da camada ionosférica, considerada a maior fonte de erro na navegação e no posicionamento após a desativação da técnica SA (*Selective Availability*), em maio de 2000.

No âmbito da navegação aérea, principalmente durante as fases de aproximação e pouso de aeronaves, o posicionamento absoluto (também conhecido por posicionamento por ponto) proporcionado pelo GNSS não atende a alguns requisitos básicos que garantem a segurança das aeronaves e, por conseguinte, dos usuários. Dentre os requisitos, pode-se citar a garantia de acurácia. Nesse contexto, o uso do DGNSS (*Differential GNSS*), melhora de forma significativa o requisito supracitado (ALVES et al., 2011; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

O conceito básico do DGNSS consiste em um receptor instalado sobre um ponto de coordenadas conhecidas (estação de referência) registrando medidas de pseudodistância em L1 transmitidas pelos satélites; conhecendo as coordenadas dos satélites e da estação de referência, ambas referenciadas em um mesmo sistema, a pseudodistância geométrica é calculada; assim, correções diferenciais são geradas tanto no domínio das pseudodistâncias quanto no domínio das coordenadas. Dessa forma, os usuários localizados próximos à estação, desde que estejam rastreando os mesmos satélites, recebem as correções diferenciais transmitidas e corrigem as suas observáveis, melhorando a acurácia (ALVES et al., 2011; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008). Esse método é viável devido à correlação espacial e temporal dos erros provenientes das camadas troposférica e ionosférica, das efemérides e dos relógios dos satélites entre a estação de referência e o usuário, com a ressalva de que a distância entre ambos seja da ordem de dezenas de quilômetros. Em contrapartida, os erros de multicaminho dos sinais e de ruídos do receptor

não são correlacionados, não sendo, portanto, corrigidos pelo DGNSS. Entretanto, esses tipos de erros podem ser mitigados e minimizados por meio do emprego de técnicas apropriadas (LEE, 2005). Ainda assim, a acurácia do DGNSS não é suficiente para assegurar operações com aeronaves, que demandam também segurança de voo, integridade, continuidade e disponibilidade (ICAO, 2013a).

De modo a conduzir um voo seguro, o comandante da aeronave deve ser alertado em tempo real se o erro posicional excede um determinado limite de alerta, tanto na componente vertical, designado pela sigla VAL (*Vertical Alert Limit*), quanto na componente horizontal, dado por HAL (*Horizontal Alert Limit*). O erro posicional, representado pelo nível de proteção, também é decomposto nas duas componentes, sendo VPL (*Vertical Protection Level*) para a direção vertical e HPL (*Horizontal Protection Level*) para a direção horizontal. Assim, para a segurança do voo, os valores de VPL e HPL devem ser inferiores aos valores de VAL e HAL, respectivamente. Caso sejam superiores e a aeronave não for informada em um determinado intervalo de tempo, há o risco eminente de acidente aéreo (DATTA-BARUA, 2008; LEE, 2005).

Em resposta a essa problemática vêm sendo desenvolvidos sistemas denominados de Sistemas de Aumento (*Augmentation Systems*). Por exemplo, uma aplicação do DGNSS, que a partir da integração e processamento de dados de diferentes sistemas de navegação, fornece informações adicionais de correção de erros, integridade, continuidade e disponibilidade (KIM et al., 2015; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008; PULLEN, 2007). Dois tipos de Sistemas de Aumento se destacam: o GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), cujas correções diferenciais são transmitidas por meio de estações terrestres, sendo utilizado para um ambiente local ou regional (por exemplo, aeroportos), e o SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*), que transmite as correções por meio de satélites geoestacionários, possibilitando uma maior área de cobertura (países e continentes).

A agência reguladora internacional para a utilização desses Sistemas de Aumento na navegação aérea é a ICAO (*International Civil Aviation Organization*), criada em 1944 pela ONU (Organização das Nações Unidas). A agência é responsável por sistematizar os princípios e técnicas adotadas na navegação aérea internacional, além de promover o desenvolvimento e planejamento do transporte aéreo, garantindo um crescimento ordenado e seguro. Para mais detalhes da ICAO acessar <<http://www.icao.int>>.

No que concerne ao GBAS, diversos estudos sobre o seu uso para aproximações precisas de aeronaves, bem como em investigações dos efeitos dos erros sistemáticos devidos à camada ionosférica foram realizados por vários pesquisadores e

instituições envolvidas com atividades aéreas há alguns anos. Pode-se citar: Kim et al. (2015), Srinivas et al. (2014), Yoon e Lee (2014), Kim et al. (2014), Wang et al. (2014), Jung e Lee (2012), Lee et al. (2011a), Lee et al. (2011b), Datta-Barua et al. (2010), Jan (2010), Ene (2009), Mayer et al. (2009), Pullen et al. (2009), Datta-Barua (2008), Lee et al. (2007), Ene et al. (2005), Lee (2005), Luo et al. (2005), Luo et al. (2003) e Datta-Barua et al. (2002).

O GBAS possui a capacidade de corrigir a maioria dos erros envolvidos na observável pseudodistância nas proximidades de suas instalações, desde que a ionosfera apresente um comportamento não perturbado (MAYER et al., 2009), isto é, que não haja alta variabilidade na densidade de elétrons. Entretanto, dependendo do fluxo de ionização solar, da atividade geomagnética, do número de manchas solares, do ângulo zenital do Sol e da localização geográfica, a ionosfera pode apresentar fortes perturbações (CAMARGO, 1999; LEICK, 1995), proporcionando assim uma ameaça à integridade do GBAS (MAYER et al., 2009; PULLEN et al., 2009), uma vez que podem ser diferentes os efeitos ionosféricos em pequenas distâncias.

Um dos princípios básicos do GBAS é que as estações de referência (geralmente quatro) e o receptor da aeronave rastreiem simultaneamente um determinado número mínimo de satélites, cujos sinais sejam submetidos a atrasos devido à ionosfera. No entanto, esses atrasos não são iguais, porque as linhas de visada são diferentes. Em contrapartida, conforme a aeronave se aproxima das estações de referência, a diferença entre os erros ionosféricos tende a ser mínima (DATTA-BARUA et al., 2002).

Dada a problemática, pesquisadores da *Stanford University* dos Estados Unidos desenvolveram um modelo de risco ionosférico, a fim de estimar a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso (erro) proporcionado de um satélite a uma estação de referência e o atraso do sinal desse mesmo satélite ao receptor da aeronave. Tal estimativa deve considerar uma determinada distância limite máxima, de modo a representar a pior situação e definir os limites de erros tolerados para a estimativa da qualidade do posicionamento da aeronave nas fases de aproximação e pouso (DATTA-BARUA et al., 2010). A análise final é então realizada a partir da razão entre a diferença do erro introduzido pela ionosfera e uma distância característica de separação entre as linhas de visada, razão essa denominada de gradiente ionosférico (DATTA-BARUA et al., 2010; DATTA-BARUA et al., 2002).

O modelo em questão, denominado de *CONUS (Conterminous United States) Threat Model*, utilizou dados GPS de vários anos das estações de referência de operação contínua norte-americana CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) para

a determinação dos parâmetros do modelo (gradiente ionosférico, extensão e velocidade da frente ionosférica e valor máximo de atraso ionosférico), contemplando diferentes cenários de atividades ionosféricas. No entanto, a particularidade do modelo é que o mesmo foi desenvolvido para ser aplicado na região latitudinal dos Estados Unidos (médias latitudes), cujo comportamento da ionosfera é mais estável (DATTA-BARUA et al., 2010). Para as demais regiões da Terra, o uso do *CONUS Threat Model* não é recomendado inicialmente (KIM et al., 2015). Entre estas se encontra a região equatorial e de baixas latitudes, onde se localiza o Brasil, que apresenta a ocorrência da Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), cintilação ionosférica e Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).

Baseado no *CONUS Threat Model*, alguns países desenvolveram, ou adaptaram, e avaliaram seus próprios modelos de risco ionosférico, como os casos da Alemanha (MAYER et al., 2009), Austrália, Coreia do Sul (KIM et al., 2015) e Equador (SÁNCHEZ-NARANJO et al., 2017).

No Brasil, o órgão responsável pelo controle das atividades relacionadas ao espaço aéreo, com destaque à proteção do voo, é o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). Em 2011, o Departamento adquiriu uma estação GBAS modelo SLS-4000 da empresa norte-americana Honeywell, a qual foi instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com o intuito de avaliar a qualidade e segurança do serviço no âmbito brasileiro. Entretanto, ressalva-se que o equipamento está certificado para operação somente nos territórios dos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália, por meio dos modelos de risco (ICEA, 2013).

Assim, o desenvolvimento ou adaptação de um modelo de risco ionosférico para o Brasil torna-se uma necessidade e uma realidade, sobretudo no que diz respeito à modelagem e mitigação dos efeitos ionosféricos característicos da região, haja vista que se trata de uma tecnologia que está sendo implantada no território nacional. A demanda por viagens aéreas, conforme pode ser verificado pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO, 2014) e por Chujo e Walter (2006), requisitará melhores condições operacionais, visando otimizar o controle do tráfego aéreo. Dessa forma o GBAS poderá substituir o ILS (*Instrument Landing System*), amplamente utilizado nos aeroportos nacionais, com uma série de vantagens, tais como: possibilidade de aproximações em curva, definição de mais de um gradiente de descida para uma mesma pista, necessidade de uma única estação GBAS para servir a diversas pistas (inclusive aeródromos distintos) e menor custo de instalação e de manutenção (ICEA, 2013).

Para o monitoramento e modelagem dos efeitos ionosféricos no Brasil, além do desenvolvimento ou adaptação e avaliação do próprio modelo de risco, pode-se utilizar dados GNSS de redes ativas, como a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), a GNSS-SP (Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo), a CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) / CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*), a IGS (*International GNSS Service*), a LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*) e a do ICEA (Instituto de Controle do Espaço Aéreo), que juntas possuem aproximadamente 250 estações espalhadas pelo território sul-americano, das quais mais de uma centena também transmite os dados em tempo real. Estudos sobre o comportamento da camada ionosférica utilizando dados GNSS coletados com receptores de dupla frequência podem ser verificados, por exemplo, em Barbosa et al. (2018), Barros et al. (2018), Figueiredo et al. (2018), Takahashi et al. (2018), Pereira e Camargo (2017), Pereira e Camargo (2016), Pereira (2015), Pereira e Camargo (2014), Pereira et al. (2014), Matsuoka et al. (2013), Oladipo e Schüller (2013) e Pereira e Camargo (2013).

A modernização do sistema GPS, resultante do lançamento dos satélites do bloco IIF, disponibiliza uma nova frequência para o uso civil, chamada de portadora L5 (1.176,45 MHz), protegida mundialmente para a radionavegação aeronáutica. Assim, o uso concomitante da L1 e L5 na navegação aérea permitirá uma minimização do erro ionosférico, bem como o melhoramento dos sinais GBAS à medida que novos receptores multifrequência forem utilizados na configuração desse conceito, uma vez que o ruído da L5 é significativamente menor (CIRCIU et al., 2014). Atualmente há em operação 12 satélites GPS modernizados do bloco IIF (GPS, 2018). De acordo com Circiu et al. (2014), Jan (2010), Suzuki et al. (2010) e Ene (2009), a utilização de sinais das portadoras L1 e L5 no GBAS poderá melhorar consideravelmente a correção dos efeitos da ionosfera. Assim, investigações sobre o uso da nova portadora para estudos de mitigação dos efeitos da ionosfera no Brasil, no contexto do GBAS, também se tornam necessárias.

Outra questão diz a respeito ao uso dos sinais GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) e Galileo no sistema GBAS, os quais, juntamente com os satélites GPS, proporcionam uma maior quantidade de configurações geométricas de satélites. Esta utilização conjunta possibilita o aumento do grau de liberdade para a aplicação da técnica *Screening*, que visa à exclusão dos satélites cujos sinais foram degradados pelos efeitos ionosféricos, sem que haja uma deterioração significativa do PDOP (*Positioning Dilution of Precision*), ou por meio da ponderação das observáveis dos satélites no modelo

estocástico. As contribuições do uso dos sistemas GLONASS e Galileo no GBAS podem ser consultadas em Pullen (2007) e Stanisak et al. (2014).

Considerando a importância e os benefícios do uso do GBAS no Brasil, a presente pesquisa visa investigar a aplicabilidade do *CONUS Threat Model* no território nacional, a partir da utilização de dados GPS, GLONASS e Galileo das redes RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, IGS, LISN e ICEA, de 2000 a 2016, contemplando os ápices dos ciclos solares 23 e 24. Adicionalmente, visa estimar os parâmetros do modelo para os principais aeroportos internacionais considerando a variação sazonal, pois as dimensões continentais do Brasil proporcionam diferentes condições ionosféricas e também devido ao fato que as metodologias não consideram a variável tempo nas estimativas.

1.2 Hipótese

“A estimativa dos parâmetros do modelo CONUS de risco ionosférico para o território nacional permitirá investigar se o modelo de estação GBAS atualmente disponível no Brasil pode ser empregado sem riscos nas fases de aproximação e pouso de aeronaves nos principais aeroportos internacionais brasileiros. Na possibilidade de não atender aos requisitos da ICAO e nem aos limites máximos do *CONUS Threat Model*, os valores dos parâmetros permitirão indicar, aproximadamente, em quais aeroportos e períodos do ano o GBAS poderá ser aplicado, bem como informar quais as constelações de satélites e sinais são os mais adequados para esse fim”.

1.3 Objetivos Geral e Específicos

Essa tese de doutorado tem como objetivo geral a investigação da usabilidade do modelo CONUS de risco ionosférico para GBAS no território brasileiro no contexto do GNSS, com ênfase nos erros advindos das irregularidades ionosféricas.

Os objetivos específicos consistem em:

- Investigações e análises dos benefícios quanto ao uso dos sinais GLONASS, Galileo e da portadora L5 do GPS na estimativa dos parâmetros do modelo de risco ionosférico para GBAS no Brasil;
- Estimativa do TEC (*Total Electron Content*), ROT (*Rate of Change of TEC*) e índices de irregularidades ionosféricas utilizando os sinais das portadoras L1, L2 e L5 do GPS, bem como os sinais

GLONASS e Galileo, visando à investigação da correção dos efeitos da ionosfera;

- Estimativa e avaliação de parâmetros local-temporais, considerando o *CONUS Threat Model*, para os principais aeroportos internacionais do Brasil;
- Estimativa do parâmetro de integridade σ_{vig} (desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical – *vertical ionospheric gradient sigma*) em tempo real para cada satélite GPS e GLONASS disponível e, por conseguinte, determinação dos níveis de proteção VPL e HPL da aeronave, com o intuito de compará-los com os limites de alerta VAL e HAL;
- Estimativa e análise de gradientes ionosféricos a partir do *time-step method* para um estudo de caso; e
- Monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real para a circunvizinhança de um aeroporto, a partir do emprego dos sinais GPS e GLONASS (L1/L2).

1.4 Justificativa

A ionosfera é uma das maiores fontes de erros sistemáticos no posicionamento e navegação pelo GNSS, pois as medidas são afetadas por diversas condições ionosféricas. Dessa forma, investigações relacionadas com a ionosfera são de extrema importância.

Por meio do projeto FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) de mestrado do autor (processo nº 2013/19147-1) foi desenvolvido um programa para o monitoramento das irregularidades da ionosfera e das cintilações dos sinais GNSS, em tempo real e pós-processado, utilizando dados GNSS de redes ativas (PEREIRA; CAMARGO, 2017; PEREIRA; CAMARGO, 2016). Assim, uma compreensão temporal e espacial dos efeitos ionosféricos para diferentes períodos sobre o território brasileiro pode ser obtida e analisada. Esse estudo da ionosfera sobre o Brasil é essencial para a avaliação de um modelo de risco ionosférico.

Desenvolver novos algoritmos e aprimorar os já existentes, com o intuito de minimizar os efeitos da ionosfera, principalmente nos métodos de posicionamento GNSS, consiste em uma das principais vertentes da Geodésia Espacial. O posicionamento por ponto e

o relativo, principalmente em tempo real, bem como o DGNSS, especialmente em áreas de baixas latitudes, podem ser significativamente prejudicados pelos efeitos ionosféricos, em especial pela cintilação ionosférica. Fortes cintilações podem ocasionar a perda do rastreamento dos sinais, fato esse crucial para a não obtenção da alta acurácia das soluções GNSS. No Brasil, a agricultura de precisão é muito dependente do RTK (*Real Time Kinematic*), que é fortemente prejudicada, principalmente, após o ocaso solar.

Várias pesquisas sobre os efeitos da ionosfera vêm sendo desenvolvidas no âmbito do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Presidente Prudente/SP. Além da pesquisa de mestrado do presente autor (PEREIRA, 2015), destacam-se outros trabalhos: Marques et al. (2018), Vani (2018), De Oliveira et al. (2017), Prol et al. (2017), Vani et al. (2017), Caldeira (2016), Silva et al. (2016), Jerez et al. (2015), Mendonça (2013), Aguiar e Camargo (2012), Marques et al. (2011), Barbosa et al. (2010), Dalbelo (2010), Marques et al. (2010), Polezel (2010), Matsuoka et al. (2009), Silva (2009), Dal Poz e Camargo (2008), Dal Poz et al. (2008), Aguiar e Camargo (2006) e Matsuoka et al. (2006).

Devido à localização geográfica equatorial e de baixas latitudes, o Brasil é um dos países mais afetados pelos efeitos da ionosfera, o que eleva o interesse de várias empresas, centros de pesquisas e instituições de ensino nacionais e internacionais a realizarem estudos dessa natureza no cenário brasileiro. Durante os anos de 2012 a 2015, a União Europeia, por meio da cooperação entre instituições de ensino de vários países, executou o projeto CALIBRA, o qual foi supervisionado pela GSA (*European Global Navigation Satellite Systems Agency*) e financiado pelo FP7 (*Seventh Framework Programme*). O projeto teve como objetivo a mitigação dos efeitos ionosféricos no posicionamento GNSS de alta acurácia. Outro projeto desenvolvido foi “Integração dos Dados da Rede CALIBRA e RBMC no Monitoramento de Irregularidades e Cintilação da Ionosfera”, o qual foi aprovado na “Chamada Universal – MCTI/CNPq n° 14/2013”. Um Projeto Temático FAPESP intitulado “GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão” (processo n° 2006/04008-2), implementado de 2008 a 2013, também abordou pesquisas relacionadas à ionosfera, com destaque para a agricultura de precisão. Durante o temático, quatro receptores PolaRxS-PRO da Septentrio foram adquiridos, possibilitando o monitoramento dos distúrbios ionosféricos na época.

A importância do tema da tese de doutorado também está retratada na “Chamada INCT – MCTI/CNPq/CAPES/FAPs n° 16/2014” (disponível em: <<http://www>.

cnpq.br/documents/10157/b91b7566-2110-4a29-9704-88cdd324e072>), cujos 12 temas estratégicos considerados de alto impacto científico e que preferencialmente seriam apoiados pela chamada foram: 1 – “Tecnologias ambientais e mitigação de mudanças climáticas”, 2 – “Biotecnologia e uso sustentável da biodiversidade”, (...), 12 – “Controle e gerenciamento do tráfego aéreo”. Nesse sentido, um Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia denominado “Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea” (INCT GNSS-NavAer) foi submetido em setembro de 2014, com o objetivo realizar pesquisas relacionadas à segurança e operação do controle do tráfego aéreo brasileiro utilizando o GNSS. Aprovado em 22 de dezembro de 2016 e iniciado em 8 de janeiro de 2017 (processos CNPq n° 465648/2014-2, FAPESP n° 2017/50115-0 e CAPES n° 88887.137186/2017-00), o instituto é composto por pesquisadores das seguintes instituições: FCT/UNESP (sendo o Dr. João Francisco Galera Monico o coordenador e o Dr. Milton Hirokazu Shimabukuro o vice-coordenador do INCT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), câmpus de Presidente Epitácio/SP. Salienta-se que um dos objetivos do projeto consiste na avaliação de um modelo de risco ionosférico brasileiro. Pesquisas sobre os efeitos da camada ionosférica no território brasileiro e no GBAS também estão sendo realizadas no projeto CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) “Análise da influência da ionosfera para GBAS no Brasil: modelo de risco para navegação aérea”, de coordenação do Dr. Paulo de Oliveira Camargo.

1.5 Conteúdo da Tese

O conteúdo da tese está dividido em sete capítulos. No segundo capítulo, são apresentados conceitos de GNSS e de redes ativas, com destaque para os sistemas de posicionamento GPS, GLONASS e Galileo, suas observáveis e erros sistemáticos envolvidos, a associação de GNSS com navegação aérea (em especial o DGNSS), os requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO, os Sistemas de Aumento existentes, com destaque para o GBAS e SBAS, e as principais redes ativas com estações no Brasil.

O capítulo 3 compreende uma revisão sobre a ionosfera, abordando tópicos como a fonte solar de ionização, a estratificação da atmosfera terrestre, a formação e

características da camada ionosférica, o TEC e suas variações, as irregularidades ionosféricas e a cintilação dos sinais GNSS, com apresentação de alguns índices.

O capítulo 4 é dedicado aos fundamentos do modelo CONUS de risco ionosférico, envolvendo os níveis de proteção da aeronave, os parâmetros do modelo, os métodos existentes para determinação do gradiente ionosférico, o procedimento geral para a estimativa dos parâmetros e avaliação do modelo, e o método para a estimativa do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical. É mostrado também exemplos de alguns modelos já avaliados.

No quinto capítulo, é abordado o desenvolvimento de um sistema computacional para a estimativa dos parâmetros do modelo de risco ionosférico para GBAS no Brasil, bem como, para a determinação do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical em tempo real: o MoR_Ion.

No capítulo 6, são apresentados os experimentos realizados e os resultados obtidos nessa pesquisa, que tratam: da identificação, delimitação e intensidade das irregularidades durante os ciclos solares 23 e 24; das determinações dos valores dos parâmetros do modelo de risco considerando todo o território brasileiro e dos valores dos parâmetros local-temporais para os principais aeroportos internacionais do Brasil; das investigações acerca do uso da L5 do GPS e dos sinais GLONASS e Galileo nas determinações dos parâmetros; da estimativa do σ_{vig} em tempo real para os aeroportos selecionados a partir do uso de medidas de pseudodistância filtrada pela fase da portadora; da estimativa dos níveis VPL e HPL em tempo real para a aproximação e pouso preciso por meio do uso de dados do GBAS, de aeronave e do σ_{vig} ; da estimativa de gradientes ionosféricos a partir do *time-step method*; além do monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real a partir do emprego dos sinais GPS e GLONASS (combinação de portadoras L1/L2).

Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

No Apêndice A, encontram-se os dias selecionados para a avaliação do *CONUS Threat Model* no Brasil.

2 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE E REDES ATIVAS

O termo GNSS, criado em meados de 1990 pela ICAO durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea, traduz no que há de mais moderno e atual quando se trata de posicionamento por satélites artificiais, seja nas modalidades terrestre, aérea, marítima ou espacial (MONICO, 2008).

Amplamente conhecido pelas comunidades usuária e científica, os Sistemas Globais de Navegação por Satélite não se resumem simplesmente ao GPS norte-americano, mas também a outros sistemas, como o completo e ativo GLONASS da Rússia, o proeminente Galileo da União Europeia e o chinês BeiDou/Compass. Sistemas Regionais e de Aumento também fazem parte do GNSS, como por exemplo, o QZSS (*Quase-Zenith Satellite System*) do Japão, o IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) da Índia, os SBAS WAAS (*Wide Area Augmentation System*) dos Estados Unidos, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) da Europa, MSAS (*MSAT Satellite-Based Augmentation System*) do Japão, GAGAN (*GPS Aided GEO Augmented Navigation*) da Índia, SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) da China e o SDCM (*System for Differential Correction and Monitoring*) da Rússia, além dos GBAS espalhados pela Terra, como por exemplo, o norte-americano LAAS (*Local Area Augmentation System*) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

Uma breve descrição dos principais sistemas GNSS (GPS, GLONASS e Galileo), bem como as observáveis e os erros sistemáticos envolvidos são apresentados na sequência. O uso do GNSS na navegação aérea, os Sistemas de Aumento GBAS e SBAS, além do ABAS (*Aircraft-Based Augmentation System*) e GRAS (*Ground-Based Regional Augmentation System*), bem como, as redes ativas disponíveis no Brasil também são abordados.

2.1 GPS, GLONASS e Galileo

O GPS é um sistema espacial que proporciona a posição, a velocidade e a disseminação de tempo (PVT – *Position, Velocity and Time*) em um sistema padrão, a qualquer instante, em qualquer local próximo da Terra, invariavelmente às condições meteorológicas. Para isso, é necessário, no mínimo, medidas simultâneas provenientes de quatro satélites (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Em 1985, quando foi declarado totalmente operacional, o segmento espacial consistia de 24 satélites, distribuídos em seis planos orbitais igualmente espaçados e inclinados de 55° em relação ao plano do equador, com quatro satélites em cada plano, situados a uma altura de 20.200 km e com período de revolução de 12h siderais (MONICO, 2008).

Atualmente, a constelação conta com 32 satélites, sendo 31 operacionais e um em manutenção (GPS, 2018), emitindo três frequências na banda L, denominadas de portadoras L1, L2 e L5 (apenas os 12 satélites do bloco IIF emitem as três frequências). As portadoras L1, L2 e L5 são geradas a partir da multiplicação da frequência fundamental 10,23 MHz pelas constantes 154 (1.575,42 MHz), 120 (1.227,60 MHz) e 115 (1.176,45 MHz), respectivamente (MONICO, 2008).

A portadora L1 é modulada pelos códigos PRN (*Pseudo Random Noise*), conhecido como código C/A (*Coarse/Acquisition*), e pelo código P (*Precise or Protected Code*). A portadora L2, por sua vez, é modulada pelo código P e pelo código civil L2C. Já o sinal L5 é modulado por uma taxa de transmissão dez vezes maior que o código C/A; esse sinal é protegido mundialmente para uso de radionavegação da aeronáutica e para apoio a aplicações de segurança na aviação (MONICO, 2008).

Em relação ao referencial geodésico, as efemérides transmitidas pelos satélites GPS estão associadas ao WGS84 (*World Geodetic System 1984*); já as efemérides precisas produzidas pelo IGS são referenciadas no ITRF2014 (*International Terrestrial Reference Frame 2014*). Esse segundo tipo de efemérides é disponibilizado com o intuito de atender os usuários que necessitam de posicionamento com acurácia melhor que a proporcionada pelas efemérides transmitidas (MONICO, 2008; SEEBER, 2003). Três tipos de efemérides são gerados pelo IGS (IGS, 2018b; MONICO, 2008):

- IGS (Efemérides IGS Precisas): resultantes da combinação das órbitas de vários centros de análises e disponíveis com latência da ordem de 13 dias após a coleta de dados;
- IGR (Efemérides IGS Rápidas): disponíveis com latência de 17h; e
- IGU (Efemérides IGS Ultrarrápidas): compostas de duas partes, uma predita e disponível em tempo real e outra com inclusão de observáveis e disponíveis com latência de três horas. São fornecidas pelo IGS quatro vezes ao dia: 3h, 9h, 15h e às 21h TU (Tempo Universal).

O sistema de tempo do GPS é o Tempo Universal Coordenado (UTC – *Universal Time Coordinated*), sem a introdução das correções de segundos inteiros (*leap seconds*) (MONICO, 2008).

Desenvolvido na ex-União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e atualmente mantido pela Federação Russa, o sistema GLONASS é similar ao sistema dos Estados Unidos, salvo algumas características descritas a seguir.

O segmento espacial foi declarado completo e ativo em 1996, com 24 satélites ativos e um de reserva. Entretanto, devido à falta de manutenção e de recursos do governo russo, o número de satélites decresceu nos anos posteriores. Porém, hoje a constelação encontra-se com 26 satélites (24 operacionais, um em testes e outro em manutenção) (GLONASS, 2018). Os satélites estão distribuídos em três planos orbitais, separados de 120° e com inclinação de 64,8° em relação ao equador, possibilitando assim uma maior cobertura latitudinal em comparação ao GPS. As órbitas possuem altura de 19.100 km e período de 11h15 siderais (MONICO, 2008).

Os satélites GLONASS emitem sinais em duas bandas denominadas de L1 e L2, análogas ao GPS; no entanto, utiliza divisões múltiplas de frequências para diferenciar cada satélite (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*). Os valores nominais das frequências de cada satélite para as portadoras L1 (f_{L1}) e L2 (f_{L2}), em MHz, são dados pelas equações (1) e (2), respectivamente (MONICO, 2008; SANTOS et al., 2001):

$$f_{L1}(k) = 1.602 + k \cdot 0,5625 \quad (1)$$

$$f_{L2}(k) = 1.246 + k \cdot 0,4375 \quad (2)$$

onde k representa o número do canal do satélite (fornecido no almanaque). Inicialmente cada satélite teria a sua própria frequência, sendo k um valor positivo maior ou igual a zero e menor ou igual a 24. Posteriormente foi introduzida uma modificação, na qual dois satélites antípodas podem utilizar um mesmo canal. Atualmente k varia entre -7 e 6 (SEEBER, 2003; SANTOS et al., 2001). A Tabela 1 apresenta a distribuição do número do canal k para cada uma das oito posições orbitais destinadas aos satélites (*slots*) dentro dos planos orbitais 1, 2 e 3 (GLONASS, 2018).

Tabela 1 – Número do canal k para cada uma das posições orbitais do GLONASS.

Plano Orbital 1	Posição Orbital (<i>slot</i>)	1	2	3	4	5	6	7	8
	Número do canal (<i>k</i>)	1	-4	5	6	1	-4	5	6
Plano Orbital 2	Posição Orbital (<i>slot</i>)	9	10	11	12	13	14	15	16
	Número do canal (<i>k</i>)	-2	-7	0	-1	-2	-7	0	-1
Plano Orbital 3	Posição Orbital (<i>slot</i>)	17	18	19	20	21	22	23	24
	Número do canal (<i>k</i>)	4	-3	3	2	4	-3	3	2

Fonte: GLONASS (2018).

Em contrapartida, o GLONASS conseguiu aprovação para adicionar o código de divisão de acesso múltiplo (CDMA – *Code Division Multiple Access*) utilizado pelo GPS e Galileo. Assim, os futuros satélites do sistema GLONASS, que utilizarão CDMA nas suas transmissões, terão maior interoperabilidade com os demais. No CDMA, os satélites são distinguidos pelos diferentes ruídos pseudoaleatórios do código na mesma frequência (MONICO, 2008).

A respeito do referencial geodésico, o sistema russo adota o PZ90 (*Parametry Zemli 1990*) na definição das órbitas transmitidas (MONICO, 2008; SANTOS et al., 2001). Já o sistema de tempo também se baseia no UTC, porém realizado pela Rússia e que faz a inclusão dos *leap seconds*.

A Comunidade Europeia, por intermédio da GSA, vem desenvolvendo e implementando o sistema de posicionamento Galileo. Trata-se de um sistema aberto, global, de controle civil e compatível com o GPS. A constelação de satélites está dividida em três planos orbitais com inclinação de 56° em relação ao equador, sendo previstos nove satélites igualmente espaçados em cada plano e com uma altura de 23.616 km (GALILEO, 2018; SEEBER, 2003).

Em relação aos sinais, o sistema possui E1-L1-E2, E5 A/B e E6 utilizando quatro portadoras: E1 com frequência 1.575,42 MHz, E5A com 1.176,45 MHz, E5B com 1.207,14 MHz e E6 com 1.278,75 MHz (GALILEO, 2018; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Salienta-se que as portadoras L1 e L5 do GPS encontram-se nas mesmas frequências das portadoras E1 e E5A do Galileo, sucessivamente (na tese, as portadoras E1 e E5A do Galileo serão referenciadas por L1 e L5 para simplificar a escrita).

Atualmente, há 18 satélites operacionais, dois em fase de testes, dois não disponíveis e quatro para serem lançados. Os operadores pretendem ter a constelação completa (27 satélites e três de reserva) disponível em 2020 (GALILEO, 2018).

O Galileo possui o seu próprio sistema de tempo (GST – *Galileo System Time*), o qual é mantido pelo TAI (Tempo Atômico Internacional). O mesmo acontece para o

referencial geodésico, denominado GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*), compatível com o ITRF (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

2.1.1 Observáveis GNSS

As observáveis básicas do GNSS são a pseudodistância e a fase de batimento da onda portadora, também conhecida simplesmente por fase da portadora (MONICO, 2008). O GNSS também dispõe de outras observáveis, tais como a variação Doppler e o SNR (*Signal to Noise Ratio*).

A medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite (s) no instante de transmissão (t^s) e sua réplica gerada no receptor (r) no instante de recepção (t_r) do sinal. O modelo funcional da pseudodistância, em metros, é dado por (MONICO, 2008):

$$PD_r^s(t) = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s + v_{PD_r^s} \quad (3)$$

sendo:

- ρ_r^s – distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor, no instante de recepção do sinal;
- c – velocidade da luz no vácuo;
- dt_r – erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante de recepção;
- dt^s – erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante de transmissão;
- I_r^s – erro devido à ionosfera (atraso ionosférico);
- T_r^s – erro devido à troposfera (atraso troposférico);
- dm_r^s – erro devido ao multicaminho;
- Orb^s – erro da posição do satélite; e
- $v_{PD_r^s}$ – erro da pseudodistância devido aos efeitos sistemáticos não modelados (relatividade, atraso entre duas portadoras no *hardware* do satélite e do receptor, fase *wind-up*, rotação da Terra, dentre outros) e aleatórios.

Apesar de a pseudodistância obtida pelo código ser a observável mais utilizada, sua precisão é da ordem métrica. Uma observável mais precisa, de ordem centimétrica a milimétrica, é a fase da portadora (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

A medida da fase da portadora é determinada a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal, e sua réplica gerada pelo receptor, no instante de recepção. Diferentemente da pseudodistância, apenas uma medida fracionária é obtida (Φ), restando como incógnita um número inteiro de ciclos desconhecido denominado de ambiguidade (N_r^s) (MONICO, 2008).

O modelo funcional da fase da portadora, em ciclos, é dado pela equação (4) (MONICO, 2008; SEEBER, 2003):

$$\Phi_r^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s + Orb^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (\Phi^s(t_0) - \Phi_r(t_0)) + N_r^s + v_{\Phi_r^s} \quad (4)$$

onde:

- f – frequência nominal da onda portadora;
- $\Phi^s(t_0)$ – fase inicial no satélite, correspondente à época de referência t_0 ;
- $\Phi_r(t_0)$ – fase inicial no receptor, correspondente à época de referência t_0 ;
- N_r^s – ambiguidade da fase no instante inicial de rastreamento; e
- $v_{\Phi_r^s}$ – erro da fase da portadora devido aos efeitos sistemáticos não modelados (relatividade, atraso entre duas portadoras no *hardware* do satélite e do receptor, fase *wind-up*, rotação da Terra, dentre outros) e aleatórios.

Observa-se que o termo referente ao erro devido à ionosfera (I_r^s) na equação da fase é negativo, ao passo que na equação da pseudodistância é positivo. Isto se deve ao avanço que a observável fase da portadora sofre ao atravessar a ionosfera, ao contrário da pseudodistância que se sujeita a um retardo (MONICO, 2008; CAMARGO, 1999).

2.1.2 Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis

As observáveis GNSS estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos ou grosseiros. A respeito dos erros sistemáticos, os mesmos caracterizam-se por ter a causa

conhecida, podendo ser parametrizados ou reduzidos por meio de técnicas apropriadas de observação ou de processamento dos dados.

A Tabela 2 apresenta os principais tipos de erros sistemáticos envolvidos no GNSS, bem como suas respectivas fontes. A abordagem e tratamento de cada um dos erros são necessários para a obtenção de resultados de alta acurácia. A grande maioria dos erros é praticamente eliminada quando se realiza o posicionamento relativo ou por meio da combinação linear entre as portadoras. Outros são reduzidos na adoção de modelos matemáticos adequados.

Tabela 2 – Fontes e erros sistemáticos envolvidos no GNSS.

Fontes	Erros
Satélite	Erro da órbita, erro do relógio, relatividade, atraso entre duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite, centro de fase da antena do satélite, fase <i>wind-up</i>
Propagação do Sinal	Atraso troposférico, atraso ionosférico, perdas de ciclos, multicaminho, rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio, erro entre os canais, centro de fase da antena do receptor, atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor, fase <i>wind-up</i>
Estação	Erro nas coordenadas, multicaminho, marés terrestres, movimento do Pólo, carga oceânica, pressão atmosférica

Fonte: Monico (2008).

O erro relacionado à propagação do sinal na ionosfera será apresentado com mais detalhes no próximo capítulo. Para mais informações sobre as demais fontes e erros sugerem-se: Hofmann-Wellenhof et al. (2008), Monico (2008), Seeber (2003) e Leick (1995).

2.2 GNSS e Navegação Aérea

Uma aplicação civil significativa do GNSS é o suporte à navegação aérea. Com a crescente demanda mundial de viagens aéreas no século XXI, a comunidade da aviação tem sido amparada por muito dos benefícios que o GNSS pode proporcionar, além dos já disponibilizados pelos sistemas inerciais e pelos sistemas de radionavegação, como economia e segurança de voo. No entanto, a navegação aérea, principalmente durante as fases de aproximação e pouso de aeronaves, requer acurácia melhor que o posicionamento absoluto pode proporcionar (LEE, 2005). Nesse contexto, o uso do DGNSS melhora de forma significativa o requisito supracitado (ALVES et al., 2011; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).

2.2.1 DGNSS

O DGNSS, antigamente denominado por DGPS (*Differential GPS*), foi concebido com a finalidade de reduzir os efeitos provocados pela técnica SA.

Atualmente, o posicionamento diferencial é utilizado para melhorar a posição de um usuário por meio da aplicação de correções provenientes de uma estação GNSS de monitoramento contínuo, chamada de estação de referência ou estação base (estação de coordenadas conhecidas).

O princípio básico para a viabilidade do DGNSS está na consideração de que há uma correlação espacial e temporal dos erros ionosféricos, troposféricos, das efemérides e dos relógios dos satélites entre a estação de referência e o usuário (estação móvel), desde que a distância entre ambos seja da ordem máxima de dezenas de quilômetros. Em contrapartida, os erros de multicaminho e de ruídos do receptor não são correlacionados, não sendo, portanto, corrigidos pelo DGNSS. No entanto, esses tipos de erros podem ser mitigados por meio de emprego de técnicas apropriadas, como instalar as estações de referência e móvel em lugares sem obstruções físicas, ou por meio de calibração de antenas, por exemplo (LEE, 2005). Para fins de exemplificação, a Tabela 3 apresenta valores nominais dos erros que ocorrem no posicionamento absoluto GPS e os respectivos valores dos erros residuais no posicionamento diferencial, segundo Lee (2005).

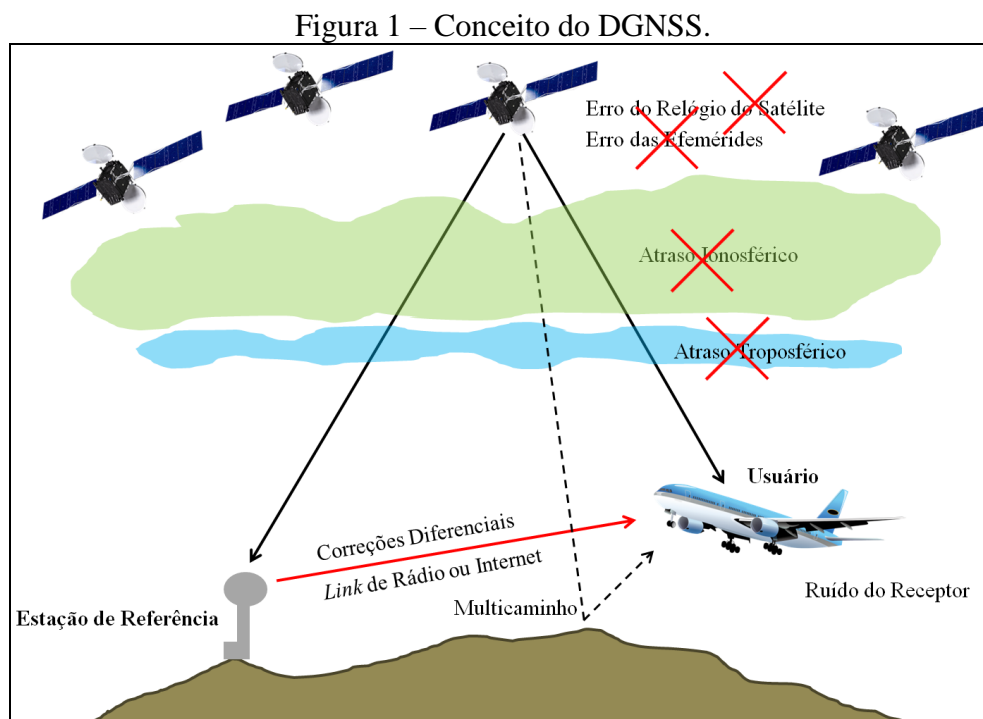
Tabela 3 – Valores nominais dos principais erros no posicionamento absoluto GPS e os respectivos valores dos erros residuais no DGNSS.

Tipo de Erro	Erro Nominal do Posicionamento Absoluto GPS	Erro Residual DGNSS
Relógio do Satélite	1 a 2 m (RMS)	0,0 m
Órbita do Satélite	1 a 2 m (RMS)	0,1 m (RMS)
Atraso Ionosférico	2 a 10 m na direção zenital	0,2 m (RMS)
Atraso Troposférico	2,3 a 2,5 m na direção zenital ao nível do mar	0,2 m (RMS) mais o efeito da altitude
Multicaminho	Código: 1 a 5 m Fase da Portadora: 1 a 5 cm	Descorrelacionado entre a estação de referência e o usuário
Ruído do Receptor	Código: 0,5 m (RMS) Fase da Portadora: 1 a 2 mm (RMS)	Descorrelacionado entre a estação de referência e o usuário

RMS – *Root Mean Square* (Raiz Média Quadrática)

Fonte: Lee (2005).

As correções diferenciais podem ser enviadas ao usuário por meio de um *link* de rádio ou por protocolos de internet (Figura 1), sendo o formato largamente empregado aquele descrito pelo RTCM SC-104 (*Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104*) (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008).



Fonte: Adaptado de Lee (2005).

Dois tipos de procedimentos podem ser utilizados para a geração das correções diferenciais (SEEBER, 2003):

- Correções diferenciais na posição: a posição da estação de referência determinada no posicionamento pelo GNSS é comparada com a posição considerada verdadeira. As correções diferenciais da posição em coordenadas geodésicas cartesianas (ΔX , ΔY e ΔZ) ou curvilíneas ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ e Δh) são transmitidas e utilizadas pelo usuário para corrigir a posição da estação móvel. Entretanto, essa técnica apresenta deficiências, tal como o fato de requerer que a estação de referência e a estação móvel estejam rastreando e coletando os sinais dos mesmos satélites, para assegurar que as diferenças em posição expressem de maneira mais fidedigna os erros envolvidos (KAPLAN; HEGART, 2006); ou

- Correções diferenciais na pseudodistância: as pseudodistâncias de todos os satélites visíveis registradas nos arquivos de observação são comparadas com as calculadas a partir das coordenadas da estação de referência e dos satélites. Ressalta-se que as coordenadas da estação e dos satélites devem estar em um mesmo referencial. Assim, as diferenças e suas variações são enviadas para a estação móvel para corrigir as pseudodistâncias registradas. No entanto, devido à decorrelação dos erros troposféricos, ionosféricos e orbitais, quando a estação móvel se afasta da estação de referência, a acurácia decresce aproximadamente 1 centímetro para cada 1 km (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

O processamento do DGNSS é geralmente realizado em tempo quase real, pois atrasos na obtenção dos resultados podem ocorrer devido ao intervalo de tempo para o envio das correções da base para a móvel, conhecida como latência. Assim, as correções devem ser enviadas para a estação móvel com as respectivas taxas de variação (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). As taxas de atualização das correções dependem intrinsecamente da capacidade da estação de referência em realizar o posicionamento absoluto, a partir do qual se obtém o erro do relógio do receptor, e de gerar as correções e suas respectivas taxas de variação (DAL POZ et al., 2003).

De acordo com Parkison e Enge (1996), caso as correções sejam aplicadas na pseudodistância da estação móvel com uma latência de até 10 segundos, os erros comuns as duas estações serão praticamente suprimidos, proporcionando uma precisão da ordem de 1 metro (1σ) em um raio de 50 km. Todavia, Dal Poz et al. (2003) mostram que para linhas de base curtas e com latências superiores a 10 segundos (de 20 a 90 segundos), os resultados não são degradados. Isso indica que a desativação da SA acarretou em uma lenta variação dos erros, permitindo uma diminuição da taxa de atualização das correções sem que haja uma piora nos resultados do posicionamento com DGNSS.

Para as correções na pseudodistância, pode-se utilizar a observável original ou a filtrada pela fase da portadora. A escolha de uma das duas interfere na acurácia do posicionamento DGNSS, sendo que a pseudodistância original proporciona acurácia de 1 a 3 metros, aproximadamente, e a filtrada pode alcançar acurácia submétrica (SEEBER, 2003).

O raio de abrangência para que o DGNSS tenha um bom desempenho é da ordem de 150 km (PARKISON; ENGE, 1996). Porém, para algumas aplicações, um

afastamento de até 1.000 km pode proporcionar resultados coerentes, com acurácia variando de 1 a 5 metros (MONICO, 2008).

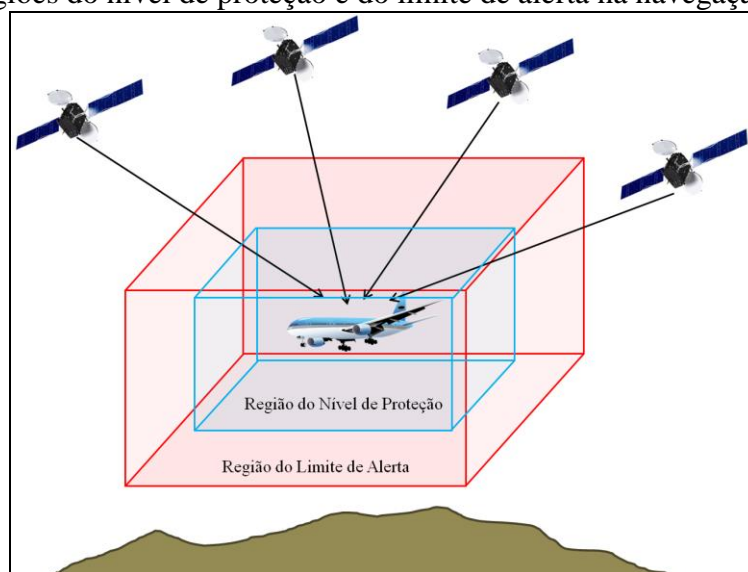
No caso de uma rede de estações de referência aplicando o conceito de DGNSS (DGNSS em rede), deve-se obter um único vetor de correção para a estação móvel, ou seja, uma única correção de pseudodistância para cada satélite. Assim, um modelo de interpolação deve ser utilizado. Vários métodos de interpolação de distâncias podem ser aplicados, como interpolação por plano de correções, interpolação por superfícies matemáticas ou interpolação por ponderação da distância entre as estações de referência e a estação móvel, sendo esse último o que apresenta os melhores resultados (ALVES, 2008).

2.2.2 Navegação de aeronaves

O melhoramento da acurácia com a utilização do DGNSS ainda não é o suficiente para auxiliar as operações de navegação de aeronaves, que exigem também segurança de voo, integridade, continuidade e disponibilidade (ICAO, 2013a).

Para uma melhor compreensão dessas demandas, a Figura 2 apresenta dois conceitos que são utilizados para descrever os sistemas de navegação aérea: limite de alerta e nível de proteção.

Figura 2 – Regiões do nível de proteção e do limite de alerta na navegação de aeronaves.



Fonte: Adaptado de Lee (2005).

Para a realização de um voo seguro, o sistema de orientação da aeronave deve ser alertado se o erro de posição excede um determinado limite. Esse limite, indicado

pelo cuboide vermelho da Figura 2, é definido e composto pelos limites de alerta (AL – *Alert Limit*): o Limite de Alerta Vertical (VAL) e o Limite de Alerta Horizontal (HAL). Se o erro no posicionamento da aeronave exceder os limites estabelecidos pela ICAO para uma determinada categoria de aproximação ou pouso, há um risco eminente à segurança. Por esse motivo, o piloto necessita de um nível de confiança em tempo real. Essa confiabilidade, indicando a incerteza sobre a posição verdadeira, é denominada de nível de proteção (PL – *Protection Level*), representado pelo cuboide azul na figura, e sendo decomposto também nas componentes vertical (VPL) e horizontal (HPL) (DATTA-BARUA, 2008; LEE, 2005).

Como indicado na Figura 2, por questão de segurança é necessário que os níveis de proteção sejam sempre menores do que os limites de alerta correspondente à fase atual do voo.

Uma vez que a precisão do GNSS varia significativamente com o tempo, devido aos efeitos dos diversos erros sistemáticos, tem-se que o erro posicional da aeronave também sofre variações. Em função disso, os cálculos dos níveis de proteção são necessários para garantir que a posição tenha sido estimada com um certo nível de confiança. Além disso, para a segurança de orientação da aeronave, quando os valores de VPL e HPL excederem os valores de VAL e HAL, o sistema precisa fornecer avisos de alerta com rapidez suficiente para que o piloto possa tomar uma decisão.

Diante do exposto, o conceito de Sistema de Aumento foi introduzido como uma aplicação do DGNSS que, a partir da integração e processamento de dados de diferentes sistemas de navegação, fornecem informações adicionais de correção de erros, integridade, continuidade e disponibilidade (KIM et al., 2015; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008; MONICO, 2008; PULLEN, 2007). A seção 2.3 apresenta com mais detalhes os Sistemas de Aumento.

2.3 Sistemas de Aumento

Devido às limitações dos sistemas de posicionamento (GPS, GLONASS e Galileo, por exemplo) na navegação aérea, os mesmos não podem ser utilizados como único método de navegação. Dos vários fatores limitantes, destaca-se que nenhum dos sistemas proporciona integridade, ou seja, a capacidade em detectar falhas e emitir avisos em tempo hábil.

Para tornar viável a utilização do GNSS como sistema principal ou auxiliar em aplicações de navegação, com respeito a aspectos como acurácia, integridade,

continuidade e disponibilidade, o serviço de navegação GNSS é fornecido usando a combinação de vários elementos instalados na superfície terrestre, nos satélites e/ou a bordo de aeronaves. Esse conjunto de elementos é chamado de Sistemas de Aumento (ICAO, 2018).

Os Sistemas de Aumento do GNSS mais comuns são (ICAO, 2018):

- Sistema de Aumento Baseado em Instrumentos a Bordo da Aeronave (ABAS): sistema que combina as informações de vários instrumentos aeronáuticos e que monitora os satélites GNSS;
- Sistema de Aumento Baseado em Satélites (SBAS): sistema que proporciona satélites auxiliares (geoestacionários) de telecomunicações e estações terrestres de referência com funções específicas distribuídas em grandes regiões, complementando o GNSS e tornando-o apto para a navegação em rota e para a aproximação e pouso preciso de aeronaves. Exemplos: WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, entre outros;
- Sistema de Aumento Baseado em Estações Terrestres (GBAS): sistema que utiliza apenas estações terrestres de telecomunicações e estações terrestres de referência com funções específicas, complementando, também, o GNSS e tornando-o apto para a aproximação e pouso preciso de aeronaves. Exemplo: LAAS; e
- Sistema de Aumento Regional Baseado em Estações Terrestres (GRAS): é um tipo de SBAS, no qual o usuário recebe informações diretamente de um grupo de estações terrestres que cobrem uma região relativamente reduzida.

O aumento do GNSS pode ser compreendido como uma forma de melhorar alguns atributos dos sistemas de navegação, como a acurácia, continuidade e disponibilidade, por meio da utilização e integração de informações externas nos cálculos, bem como disponibilizar parâmetros de integridade do sistema. Em alguns Sistemas de Aumento, essas informações externas são transmitidas como informações adicionais de fontes de erros, tais como o erro do relógio do satélite, erro de órbita, atraso ionosférico, atraso troposférico, dentre outros.

2.3.1 Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO

Antes de especificar os requisitos de desempenho padronizados pela ICAO (2013a) para cada fase de voo, deve-se, primeiramente, introduzir os conceitos que são utilizados para descrever todas as aplicações de navegação aérea: acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade.

A acurácia consiste na diferença entre a posição estimada e a posição considerada verdadeira da aeronave em condições nominais e sem falhas (LEE, 2005), incorporando tanto tendência (erros sistemáticos) quanto precisão (erros aleatórios) (MONICO et al., 2009).

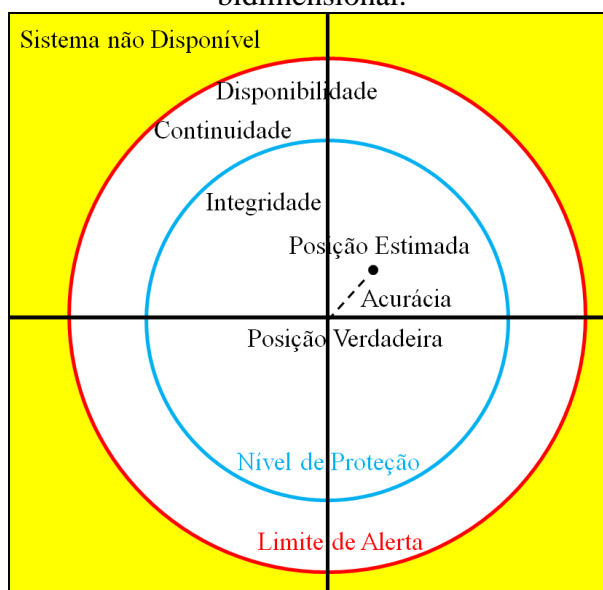
A integridade, incluindo o tempo de alerta, trata da medida da confiança, a qual pode ser empregada no lugar da precisão da informação fornecida pelo sistema. A integridade inclui a capacidade do sistema em detectar falhas e emitir avisos ao usuário, em tempo hábil, de que o sistema não deve ser utilizado para uma determinada operação de voo (LEE, 2005).

A continuidade é dada pela capacidade do sistema em realizar sua função, ou seja, garantir os requisitos de acurácia e de integridade, sem que haja interrupção durante uma operação de voo (LEE, 2005). A continuidade é expressa como uma probabilidade. Deve ser a maior probabilidade para que um serviço permaneça disponível durante todo procedimento de aproximação e pouso por instrumentos. A ocorrência de alertas no sistema de navegação, em decorrência de uma detecção de falha, constitui em uma falha na continuidade.

Por fim, a disponibilidade de um serviço é a porcentagem de tempo no qual o sistema fornece, simultaneamente, a acurácia, a integridade e a continuidade exigidas (LEE, 2005). A disponibilidade do GNSS é afetada pela geometria dos satélites em relação à área de abrangência do sistema e pelo longo período de tempo para o restabelecimento de um determinado satélite após um evento de falha.

A Figura 3 ilustra os conceitos supracitados em um plano bidimensional, onde a origem indica a posição verdadeira, o ponto preto a posição estimada (considerando a sua precisão), a circunferência azul o nível de proteção e a circunferência vermelha o limite de alerta.

Figura 3 – Conceitos de acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade em um plano bidimensional.



Fonte: Adaptado de Lee (2005).

A integridade falha quando o erro posicional (distância do ponto preto ao centro) excede o limite de alerta e esse evento não é notificado ao piloto dentro de um tempo de alerta especificado. Assim, o risco de integridade é definido como a probabilidade de que nenhum alerta seja emitido quando o erro de posição exceder o AL por um tempo maior do que o tempo de alerta. No entanto, a posição verdadeira e, conseqüentemente, o erro de posição não são quantidades que podem ser conhecidas em tempo real. Por essa razão, os níveis de proteção (VPL e HPL) precisam ser calculados sobre o nível aceitável de risco de integridade (LEE, 2005).

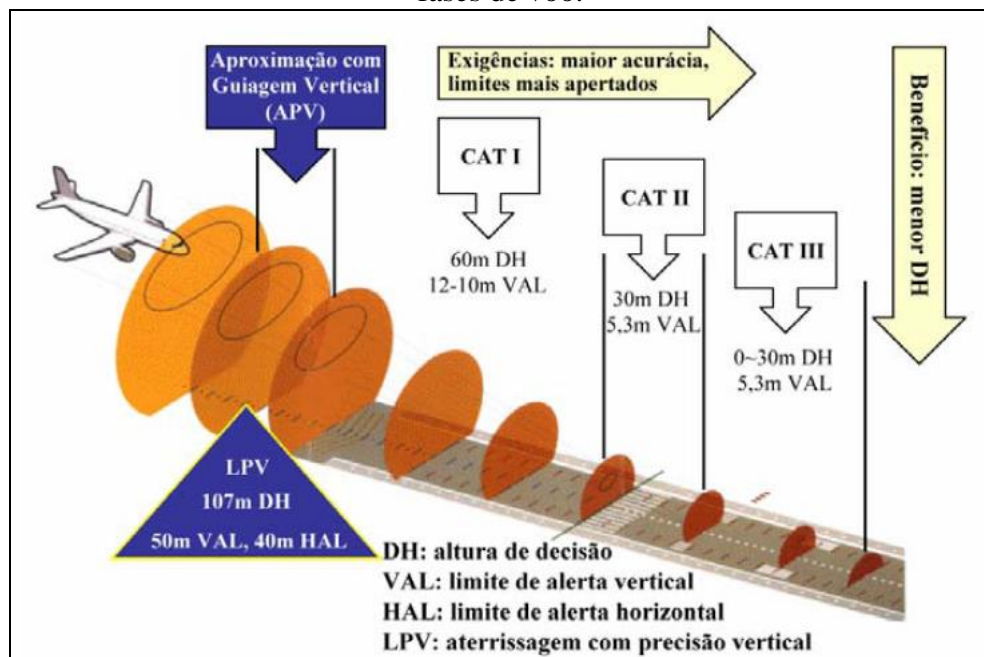
Ao contrário do risco de integridade, o risco de continuidade é definido como a frequência com o que sistema falha durante um intervalo de tempo específico. A continuidade e a integridade são requisitos concorrentes. Na situação em que os algoritmos de integridade são excessivamente sensíveis, vários alarmes falsos serão emitidos para o usuário e, por conseguinte, a continuidade do sistema irá diminuir. Por fim, se o nível de proteção (circunferência azul) exceder o limite de alerta (circunferência vermelha), o sistema não estará mais disponível. Se isso ocorrer antes de uma operação de aproximação, haverá apenas a perda de disponibilidade. Por outro lado, se o sistema falhar durante a aproximação, o risco de continuidade vai aumentar concomitantemente com a perda de disponibilidade (LEE, 2005).

Vários tipos de operações de voo podem ser executados por uma aeronave, tais como (ICAO, 2013a): em rota (oceânica/continental ou fase terminal); aproximação não precisa (NPA – *Non-Precision Approach*); decolagem; aproximação lateral precisa com

orientação vertical (LPV – *Lateral Precision Approach with Vertical Guidance*); aproximação com orientação vertical-I (APV-I – *Approach with Vertical Guidance-I*); APV-II; aproximação precisa categoria-I (CAT-I – *Precision Approach Category-I*); CAT-II; CAT-III.

Para cada operação de voo, a ICAO estabelece os requisitos de desempenho dos sinais de navegação do usuário final (*Signal-in-Space*). Os valores dos requisitos de acordo com a operação executada são apresentados na Tabela 4 e representados resumidamente na Figura 4.

Figura 4 – Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO para algumas fases de voo.



Fonte: Adaptado de Lee (2005).

A Figura 4 apresenta o termo altura de decisão (DH – *Decision Height*) que, de acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018), é uma altura específica na qual o piloto deve decidir se inicia imediatamente um procedimento de aproximação perdida (arremetida), caso não tenha avistado uma referência visual requerida, ou se prossegue na aproximação para o pouso. A DH é expressa em pés ou em metros, tendo como referência o Nível Médio dos Mares (NMM).

Tabela 4 – Requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO para cada fase de voo.

Operação de Voo	Acurácia Horizontal (95%)	Acurácia Vertical (95%)	Integridade	Continuidade	HAL	VAL	Disponibilidade	Tempo para Alerta
Em rota (oceânica/continental)	3.700 m	-	$1-1 \times 10^{-7}/h$	$1-1 \times 10^{-4}/h$ a $1-1 \times 10^{-8}/h$	7.400 m	-	0,99 a 0,99999	5 min
Em rota (fase terminal)	740 m	-	$1-1 \times 10^{-7}/h$	$1-1 \times 10^{-4}/h$ a $1-1 \times 10^{-8}/h$	1.850 m	-	0,99 a 0,99999	15 s
NPA	220 m	-	$1-1 \times 10^{-7}/h$	$1-1 \times 10^{-4}/h$ a $1-1 \times 10^{-8}/h$	556 m	-	0,99 a 0,99999	10 s
Decolagem	220 m	-	$1-1 \times 10^{-7}/h$	$1-1 \times 10^{-4}/h$ a $1-1 \times 10^{-8}/h$	556 m	-	0,99 a 0,99999	10 s
LPV	16 m	20 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximação	$1-8 \times 10^{-6}$ em 15 s	40 m	50 m	0,99 a 0,99999	10 s
APV-I	16 m	20 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximação	$1-8 \times 10^{-6}$ em 15 s	40 m	50 m	0,99 a 0,99999	10 s
APV-II	16 m	8 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximação	$1-8 \times 10^{-6}$ em 15 s	40 m	20 m	0,99 a 0,99999	6 s
CAT-I	16 m	4 a 6 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximação	$1-8 \times 10^{-6}$ em 15 s	40 m	10 a 12 m	0,99 a 0,99999	6 s
CAT-II	6,9 m	2 m	$1-1 \times 10^{-9}$ em 15 s	$1-4 \times 10^{-6}$ em 15 s	17,3 m	5,3 m	0,99 a 0,99999	1 s
CAT-III	6,2 m	2 m	$1-1 \times 10^{-9}$ em 30 s (lateral) $1-1 \times 10^{-9}$ em 15 s (vertical)	$1-2 \times 10^{-6}$ em 30 s (lateral) $1-2 \times 10^{-6}$ em 15 s (vertical)	15,5 m	5,3 m	0,99 a 0,99999	1 s

Fonte: ICAO (2013a).

Já a Tabela 5 mostra o potencial do ABAS, SBAS e GBAS em atender as necessidades de navegação para as principais operações de voo.

Tabela 5 – Potencial de operação dos Sistemas de Aumento do GNSS.

Operação de Voo	ABAS	SBAS	GBAS
Em rota (oceânica/continental)			
Em rota (fase terminal)			
NPA			
Decolagem			
LPV			
APV-I			
APV-II			
CAT-I			
CAT-II			
CAT-III			

Fonte: ICAO (2013a).

2.3.2 ABAS

O Sistema de Aumento baseado em instrumentos a bordo da aeronave, como o próprio diz, realiza a integração das informações GNSS com as informações da aeronave.

O RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) consiste na técnica mais comum de ABAS. Trata-se da utilização de medidas redundantes de pseudodistância (mínimo de cinco satélites) para detectar falhas (FD – *Fault Detection*), ou seja, detectar a presença de erro significativo na posição para um específico tipo de voo e, assim, alertar o piloto. Além da detecção do sinal de um satélite com falha, o que também pode causar um alerta é quando não há satélites suficientes que proporcionem uma boa geometria no campo de visada. O uso do GPS como orientação de rota em áreas oceânicas e em áreas remotas (desertos, por exemplo) requer que o sistema tenha a habilidade de, além de detectar as falhas, também aplique o *Screening* dos satélites degradados e continue a fornecer a orientação. Esse processo é denominado de FDE (*Fault Detection and Exclusion*), o qual necessita de um mínimo de seis satélites para executar a exclusão de um e, ainda assim, continuar com a navegação sem interrupção. No RAIM/FDE são utilizados como dados de entrada o desvio-padrão do ruído medido, a geometria de satélites e as probabilidades máximas permissíveis para um falso alerta e uma falha na detecção; já o dado de saída consiste no valor de HPL (AGUIAR, 2010).

Outra técnica muito utilizada é a que envolve ABAS com a integração de sensores a bordo da aeronave, como sistemas inerciais. A combinação do GNSS/FD ou FDE com um sistema inercial de navegação melhora a disponibilidade e a integridade do GNSS para todas as fases de voo (AGUIAR, 2010).

O receptor GNSS é um dos elementos básicos do ABAS, sendo o mesmo capaz de proporcionar no mínimo o RAIM/FD ou o RAIM/FDE. Entretanto, dependendo do tipo e modelo do receptor, o mesmo pode ser utilizado nas fases em rota (oceânica/continental e terminal) e NPA (AGUIAR, 2010).

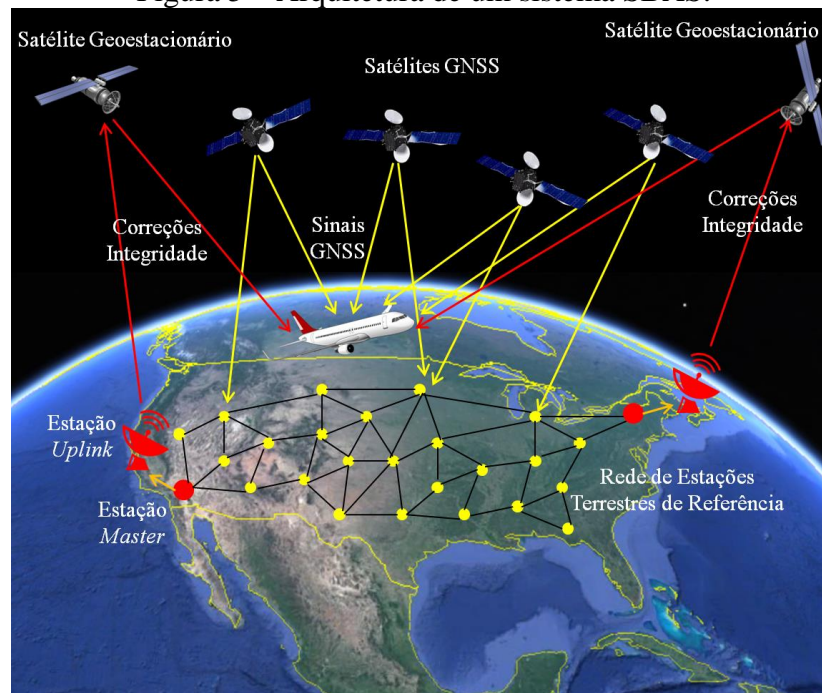
2.3.3 SBAS

O SBAS é, basicamente, um serviço WADGNSS (*Wide Area DGNSS*) para os usuários dentro de uma área de cobertura, geralmente continental. Projetado para melhorar a navegação utilizando os satélites GPS e GLONASS, o SBAS fornece informações adicionais à navegação aérea por meio de mensagens transmitidas por satélites geoestacionários. Dentre as informações fornecidas, destacam-se os parâmetros de correções de atraso ionosférico, de relógio dos satélites e de efemérides, além de integridade (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

A arquitetura de um sistema SBAS deve possuir os seguintes componentes (ICAO, 2013b), também apresentados na Figura 5:

- Rede de estações terrestres de referência, equipadas com receptores multifrequência que monitoram os sinais dos satélites;
- Estações *master*, que coletam e processam os dados das estações de referência e geram as mensagens SBAS;
- Estações *uplink*, que enviam as mensagens para os satélites geoestacionários;
- *Transponders* a bordo dos satélites geoestacionários, para transmissão das mensagens SBAS na frequência L1 do GPS; e
- Receptores a bordo das aeronaves, que captam as mensagens SBAS e aplicam essas informações para determinar a integridade e melhorar a acurácia da posição obtida.

Figura 5 – Arquitetura de um sistema SBAS.



Fonte: Adaptado de FAA (2018a).

O SBAS pode dar suporte a operações de APV a CAT-I, além de LPV, NPA e em rota, sendo esse último o que permite que a aeronave realize o voo mais eficiente entre dois aeroportos. Segundo a ICAO (2018), há dois níveis de APV: o APV-I, que pode ser suportado pelo SBAS ou pelo ABAS com Navegação Vertical Baroaltimétrica (Baro-VNAV – *Baro-Vertical Navigation*), e o APV-II, que requer somente o uso do SBAS. Em geral, quase todas as operações de voo que utilizam o SBAS apresentam um aumento significativo de segurança.

Como o SBAS pode ser implementado de diversas maneiras, a ICAO define normas para a implantação e para o formato e frequência que devem ser utilizados nas transmissões das mensagens, com o intuito de evitar problemas na navegação aérea. Dessa forma, as mensagens de diferentes SBAS são transmitidas no mesmo formato e na mesma frequência (1.575,42 MHz), possibilitando uma maior interoperabilidade a partir da perspectiva do usuário. Outro fato que pode ocorrer é a sobreposição das coberturas de SBAS distintos, o que torna possível um sistema monitorar e enviar mensagens de correções e de integridade para satélites geoestacionários de outro sistema, melhorando assim a disponibilidade por meio de fontes adicionais de medidas.

Os SARP (*Standards and Recommended Practices*) permitem três tipos de serviço SBAS. Na Tabela 6 são apresentados os tipos de serviços, as correções que devem ser fornecidas e o mais alto nível de operação de voo que pode ser suportado pelo tipo de SBAS.

Tabela 6 – Tipos de serviços SBAS disponíveis e respectivas correções fornecidas e o mais alto nível de operação de voo atendido.

Tipo de Serviço SBAS	Correções Fornecidas	Mais Alto Nível de Operação de Voo Suportado
<i>Status</i> do Satélite GNSS	Sem correções	NPA
Correções Diferenciais Básicas	Efemérides e relógio dos satélites	APV-I
Correções Diferenciais Precisas	Efemérides, relógio dos satélites e ionosfera	CAT-I

Fonte: ICAO (2013b).

O serviço SBAS de *Status* do Satélite GNSS é o de menor custo. Para seu funcionamento necessita de poucas estações de referência e de apenas uma estação *master* para fornecer a integridade. O serviço de Correções Diferenciais Básicas requer um número maior de estações de referência e uma estação *master* mais robusta, pois a mesma deve emitir correções de relógio e de efemérides para suporte à APV-I. Já o serviço de Correções Diferenciais Precisas demanda uma maior quantidade de estações de referência para modelar a camada ionosférica e fornecer correções ionosféricas, de relógio e de efemérides.

Sistemas como WAAS, MSAS e EGNOS são exemplos de SBAS do tipo Correções Diferenciais Precisas. Nesse tipo de serviço, o SBAS monitora os sinais GNSS utilizando uma densa e distribuída rede de estações de referência. Essas estações repassam os dados para uma central de processamento (estação *master*), que avalia a qualidade do sinal e estima as correções nos parâmetros das efemérides transmitidas e relógio para cada satélite. Essas mensagens de correções, juntamente com as mensagens de integridade, são transmitidas por satélites geoestacionários, na mesma frequência da portadora L1 do GPS. Os satélites geoestacionários também fornecem sinais similares aos do GPS, os quais podem ser utilizados para a determinação de pseudodistância; entretanto, somente receptores GNSS capazes de rastrear satélites geoestacionários do SBAS podem registrar tais sinais. Essas características asseguram a integridade, melhoram a disponibilidade e fornecem os requisitos necessários para operações APV e CAT-I.

A respeito dos efeitos ionosféricos, as estações de referência SBAS utilizam medidas de dupla frequência para determinar o atraso ionosférico e, posteriormente, transmitir correções por meio de pontos de grade ionosférica pré-determinados. A partir das mensagens recebidas, o receptor da aeronave interpola os valores dos pontos da grade para calcular a correção ionosférica ao longo da sua linha de visada para cada satélite.

Em adição às correções de atraso ionosférico, de relógio e de efemérides, o SBAS também estima e transmite parâmetros que informam as incertezas nas correções. O Erro na Distância Diferencial do Usuário (UDRE – *User Differential Range Error*) indica a incerteza nas correções de efemérides e de relógio. Já o GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error* – Erro Vertical da Grade Ionosférica) descreve a incerteza nas correções ionosféricas a partir do ponto da grade. O receptor SBAS combina essas estimativas de erros com as estimativas de incertezas de suas medidas de pseudodistância e de seu modelo troposférico para calcular o modelo de erro da solução de navegação.

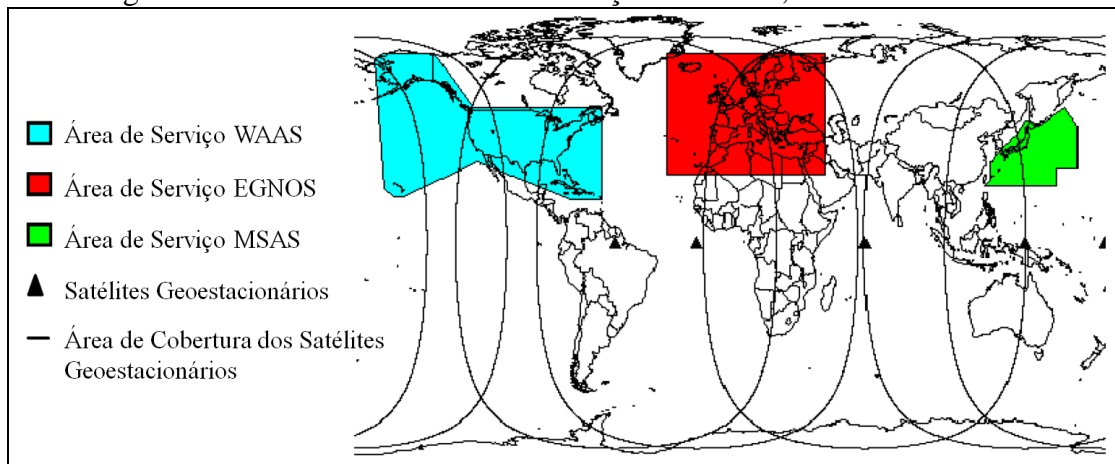
No WAAS, operado pela FAA (*US Federal Aviation Administration*), cada uma das estações de referência estima o atraso ionosférico para todos os satélites visíveis com ângulo de elevação maior que 20°, usando dados de dupla frequência. Os atrasos ionosféricos e as localizações dos IPP (*Ionospheric Pierce Point*) dos satélites são enviados para a estação *master* em tempo real. Nessa estação, os dados são coletados e realiza-se uma combinação de todas as informações ionosféricas. Na sequência, são estimados os valores do atraso ionosférico vertical para cada nó de uma grade ionosférica imaginária, com resolução de 5° x 5°. Os valores de atraso vertical e as coordenadas geodésicas curvilíneas dos pontos da grade são transmitidos aos usuários dentro da área de serviço via satélite geoestacionário. O usuário, assim, calcula, para cada satélite observado, o atraso vertical no ponto ionosférico, a partir de métodos de interpolação que usam os atrasos verticais dos quatro pontos da grade que definem o polígono que envolve o ponto do usuário. Finalmente, o atraso inclinado, na direção receptor/satélite, é calculado por meio do produto do atraso ionosférico vertical e da função de mapeamento adotada. Para mais detalhes, consultar Liao (2000) e Skone (1998).

Outro exemplo de SBAS é o EGNOS, desenvolvido pela GSA, União Europeia e pela EUROCONTROL (*European Organization for the Safety of Air Navigation*). Concebido para dar suporte aos sistemas GPS, GLONASS e Galileo, trata-se de um sistema composto por três satélites geoestacionários e pelas estações de referência em Terra, sendo similar ao WAAS e ao MSAS, esse último operado pela JCAB (*Japan's Ministry of Land, Infrastructure and Transport*). Outras informações do EGNOS podem ser encontradas em EGNOS (2018).

No Brasil, o DECEA, em meados de 2000, realizou alguns testes com o SBAS para a navegação e aproximações de aeronaves. Os testes efetuados na época demonstraram o não atendimento dos requisitos de segurança para uso no território brasileiro, e por essa razão o departamento optou por investir no sistema GBAS (ICEA, 2013).

Em se tratando de áreas de cobertura e de serviço SBAS, uma distinção deve ser realizada: a primeira trata da área de cobertura do satélite geostacionário, ao passo que a segunda é uma área estabelecida pelo órgão regulador do serviço, responsável por designar os tipos de operações que podem ser suportados dentro de uma área específica. A Figura 6 apresenta, por exemplo, as áreas de cobertura e de serviço de três sistemas: WAAS, EGNOS e MSAS.

Figura 6 – Áreas de cobertura e de serviço do WAAS, EGNOS e MSAS.



Fonte: Adaptado de ICAO (2018).

2.3.4 GBAS

O GBAS foi desenvolvido para ser utilizado nas aproximações de precisão, em princípio para CAT-I, mas com pretensão de atingir CAT-II e CAT-III. As aproximações de precisão são realizadas por aeronaves equipadas com receptor GNSS, o qual faz uso de mensagens transmitidas via VHF (*Very High Frequency*) de uma estação GBAS instalada próximo à pista de um aeroporto. As mensagens contêm correções de posição, parâmetros de integridade e procedimentos de pouso.

As correções de posição são determinadas utilizando-se um conjunto de estações de referência (geralmente quatro) equipadas com receptores de frequência simples (L1), instaladas em pontos de coordenadas conhecidas, servindo assim para a redução dos erros sistemáticos e fornecendo a conseqüente garantia de precisão requerida para a operação CAT-I. Destaca-se que o GBAS faz o uso somente da portadora L1, pois, por razões de segurança, a utilização da portadora L2 não é autorizada pela ICAO na navegação aérea, já que o sistema GPS não garante a integridade do sinal nessa portadora para fins de navegação (ICAO, 2013b). Tang et al. (2009), por outrora, apresentaram os resultados de alguns testes

realizados com a determinação da posição a partir das frequências L1 e L2, os quais mostraram uma melhora no posicionamento, mas também indicaram um maior índice de ruído no sinal devido a portadora L2.

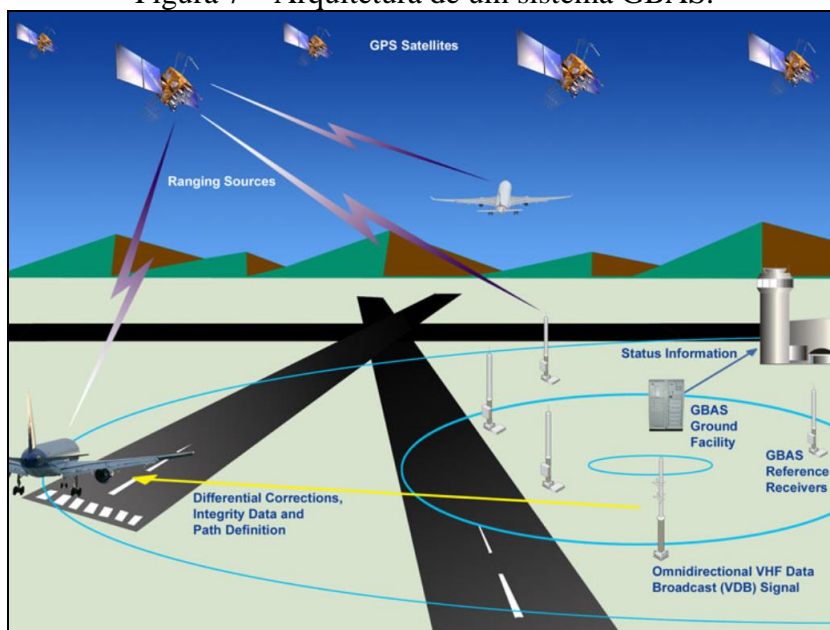
O simples fato de se utilizar apenas uma frequência do GPS impossibilita o usuário de estimar o erro devido à camada ionosférica. No entanto, a modernização do sistema GPS com a disponibilização da portadora L5 pelos satélites do bloco IIF permite minimizar o erro introduzido pela ionosfera. De acordo com Circiu et al. (2014), Jan (2010), Suzuki et al. (2010) e Ene (2009), a utilização de sinais das portadoras L1 e L5 no GBAS poderá melhorar consideravelmente a correção dos efeitos da ionosfera por meio da combinação *ion-free* ou pela filtragem da pseudodistância pela fase da portadora.

Considerando um proeminente GBAS de dupla frequência (L1 e L5), dois conceitos diferentes de gerações das correções diferenciais, a partir da filtragem da pseudodistância, podem ser utilizados: o DFree (*Divergence-Free Smoothing*) e o IFree (*Ionosphere-Free Smoothing*) (HWANG et al., 1999). Ambas as técnicas possuem vantagens e desvantagens. O DFree não remove todo o erro ionosférico diferencial, ao passo que o IFree o remove completamente (considerando os efeitos de 1ª ordem). No entanto, a segunda técnica introduz erros adicionais de código e de fase, o que eleva o ruído do receptor e o erro de multicaminho.

Enquanto o uso de duas frequências para o posicionamento aéreo com GPS não é estabelecido oficialmente, tem-se que as principais funções do GBAS atualmente são: transmitir correções diferenciais por meio de mensagens denominadas Tipo 1, transmitir parâmetros de integridade pelas mensagens Tipo 2 e enviar trajetórias de aproximação precisa através das mensagens Tipo 4 (ICAO, 2013c). A Figura 7 ilustra, de maneira simplificada, a arquitetura de um sistema GBAS.

O princípio de determinação de coordenadas pelo GPS consiste, em linhas gerais, medidas simultâneas de distâncias entre o receptor e pelo menos quatro satélites visíveis. Dessa forma, o GBAS atua nas correções das pseudodistâncias entre o receptor e cada um dos satélites rastreados, de modo que satélites com erros superiores a um limiar de aceitação são eliminados do cálculo da correção.

Figura 7 – Arquitetura de um sistema GBAS.



Fonte: FAA (2018b).

Paralelamente às correções de posição, o GBAS ainda calcula e transmite parâmetros de integridade, os quais permitem determinar o HPL e o VPL. Dentre os dois níveis de proteção, o VPL é considerado o mais crítico para o pouso de aeronaves, pois a componente vertical do posicionamento pelo GPS é a mais atingida pelos erros sistemáticos. Adicionalmente, há também a necessidade do conhecimento da altitude com alta acurácia. As mensagens Tipo 2 contêm ainda a localização das estações de referência com as respectivas configurações e dados que permitem calcular a correção troposférica para o sinal GPS.

Visando garantir a integridade, o GBAS faz o uso de quatro estações de referência para a aplicação do DGNSS, quando o mínimo necessário é de apenas uma estação. O cálculo das correções diferenciais é realizado para as quatro estações e a correção final transmitida consiste da média dos valores obtidos. Caso alguma estação apresentar um valor de correção discrepante da média, essa medida é descartada do cálculo final.

Por fim, o GBAS também transmite as mensagens Tipo 4, que contêm informações acerca do procedimento de pouso que a aeronave deve executar. Essa mensagem pode apresentar um ou mais conjunto de dados com diversos procedimentos que dão suporte a mais de uma pista de pouso e, inclusive, para mais de um aeroporto. Para cada procedimento também são transmitidos os valores de VAL e HAL.

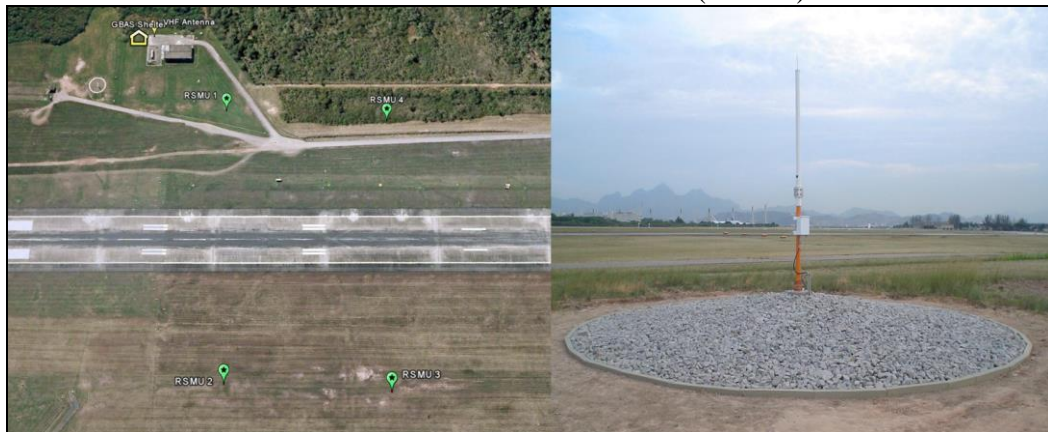
Para que o sistema GBAS atenda aos requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO, limites devem ser impostos na variação dos erros

ionosféricos entre a aeronave que se aproxima e as estações de referência, de modo a minimizar a perda de disponibilidade (DATTA-BARUA et al., 2002).

Com o intuito de estimar esses limites, a configuração do GBAS que deve ser modelada é aquela em que as estações de referência e o receptor da aeronave rastreiem simultaneamente uma determinada quantidade mínima de satélites, cujos sinais sejam submetidos a atrasos devidos à ionosfera. No entanto, esses atrasos não são iguais quando as linhas de visadas forem diferentes. Em contrapartida, à medida que a aeronave se aproxima das estações de referência, a diferença entre os erros ionosféricos tende a ser reduzida (DATTA-BARUA et al., 2002). Dada a problemática, pesquisadores da *Stanford University* dos Estados Unidos desenvolveram um modelo de risco ionosférico, a fim de estimar a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso (erro) na transmissão de um satélite a uma estação de referência e o atraso do sinal desse mesmo satélite ao receptor da aeronave. Tal estimativa deve considerar uma determinada distância limite máxima, de modo a representar a pior situação e definir os limites de erros tolerados para a estimativa da qualidade do posicionamento da aeronave nas fases de aproximação e pouso (DATTA-BARUA et al., 2010). Mais detalhes sobre modelo de risco ionosférico são apresentados no capítulo 4.

Um exemplo de GBAS é o LAAS, operado pela FAA. No Brasil, o DECEA, em 2011, adquiriu uma estação GBAS modelo SLS-4000 da empresa norte-americana Honeywell, responsável pelo seu desenvolvimento e fabricação. A estação está instalada no aeroporto internacional do Galeão, no município do Rio de Janeiro/RJ (Figura 8), com o objetivo de avaliar a qualidade e segurança do serviço prestado por tal equipamento. O modelo adquirido consiste na única estação GBAS certificada para operação até o presente momento. Todavia, ressalta-se que essa certificação é válida somente para a operação do equipamento nos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália. Por essa razão, dadas as especificidades do ambiente de operação na região equatorial e de baixas latitudes, o GBAS no Brasil se encontra em fase de avaliação da qualidade e da segurança do serviço prestado (ICEA, 2013; USTDA, 2015).

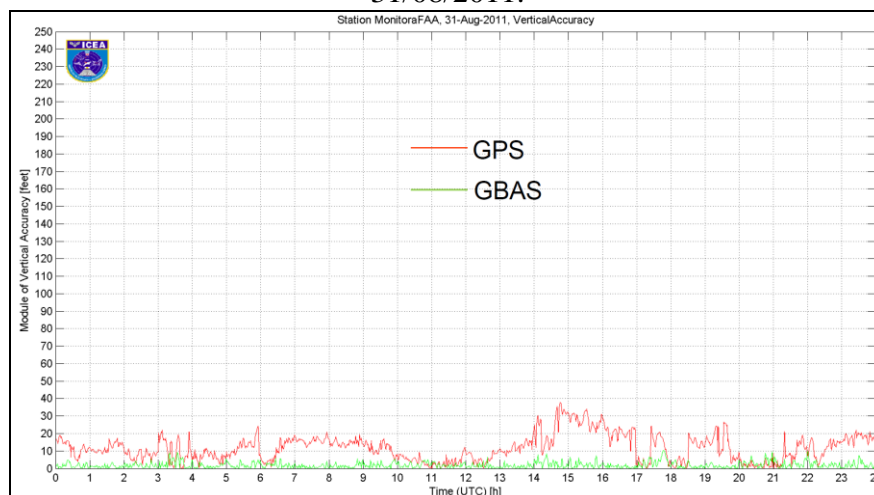
Figura 8 – Localização da estação GBAS e das quatro estações de referência no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão).



Fonte: Pereira (2016).

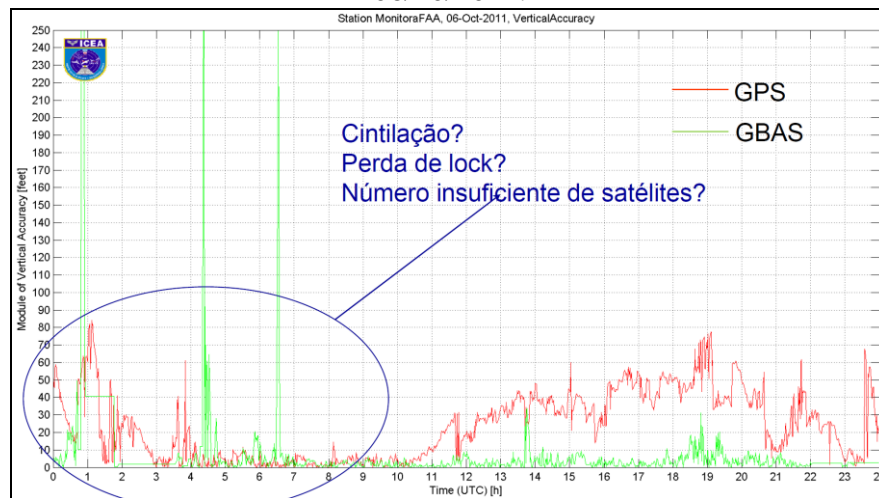
Experimentos iniciais desenvolvidos pelo ICEA apontam que, durante a maior parte do tempo em que há ocorrência de fortes cintilações ionosféricas, o GBAS corrige satisfatoriamente os erros verticais de diversas magnitudes do GPS. Em poucas ocasiões o erro de posicionamento vertical com a correção do GBAS é mais elevado que o erro obtido somente com o GPS. Entretanto, o ICEA ressalta que para obter análises mais completas e estudos mais conclusivos é de extrema importância a utilização de um conjunto de dados consistentes, contemplando períodos que envolvam todo o tipo de comportamento da ionosfera (ICEA, 2013). As Figuras 9 a 11 apresentam exemplos da precisão vertical obtida com o GPS e com o GBAS para os dias 31 de agosto, 6 de outubro e 13 de novembro de 2011, respectivamente.

Figura 9 – Precisão vertical obtida pela estação GBAS instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com uso somente do GPS e com as correções do GBAS, para 31/08/2011.



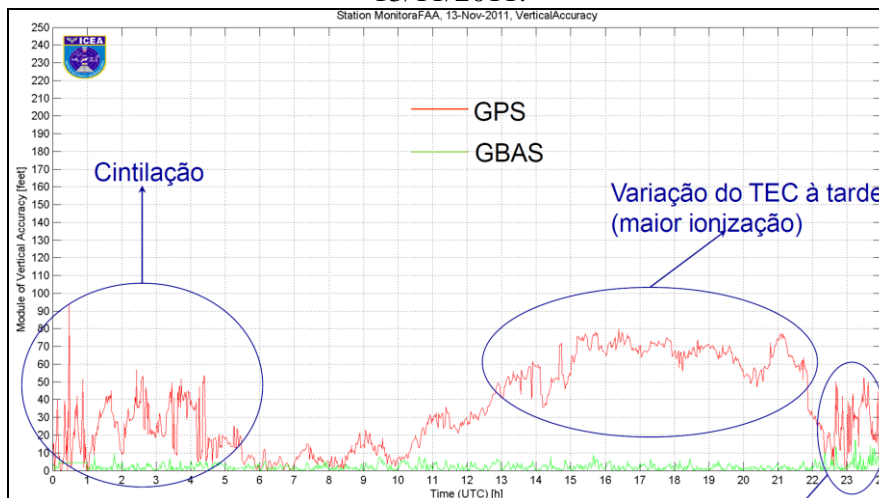
Fonte: Pereira (2016).

Figura 10 – Precisão vertical obtida pela estação GBAS instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com uso somente do GPS e com as correções do GBAS, para 06/10/2011.



Fonte: Pereira (2016).

Figura 11 – Precisão vertical obtida pela estação GBAS instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (Galeão), com uso somente do GPS e com as correções do GBAS, para 13/11/2011.



Fonte: Pereira (2016).

O acesso aos dados da estação GBAS no Galeão, bem como de outras estações norte-americanas, é livre e encontra-se disponível no *website* <<http://laas.tc.faa.gov/>>.

2.3.5 GRAS

A combinação dos Sistemas de Aumento baseados em satélites (SBAS) e em estações terrestres (GBAS) resulta no GRAS, que tem como finalidade garantir a utilização do GNSS como suporte às necessidades da navegação civil.

O GRAS é similar ao SBAS, com a única diferença na forma pela qual as informações de correção diferencial e de integridade são transmitidas aos usuários. Ao invés de se utilizar satélites geoestacionários, o GRAS envia as mensagens SBAS das estações terrestres para um local de verificação e, por conseguinte, as mensagens são reformatadas e retransmitidas no formato GBAS (ICAO, 2018).

Tal como no GBAS, cada local transmite dados via VHF em um determinado espaço de tempo. Os usuários podem utilizar um receptor GRAS para coletar os dados de aumento para operações em rota, bem como operação de aproximação ou de decolagem, dependendo da cobertura da rede VHF.

Em termos de benefícios, o GRAS pode ser utilizado em áreas onde os satélites geoestacionários não são disponíveis ou nas situações em que se tem um custo muito elevado para a transmissão de dados SBAS.

2.4 Redes Ativas

Rede ativa consiste em um conjunto de receptores de sinais GNSS, instalados em marcos/pilares com coordenadas conhecidas, que operam continuamente ou por determinado período de tempo, sendo controlada por um centro operacional responsável por manter o sistema e disponibilizar os dados (MONICO, 2008).

As principais redes ativas com estações no território brasileiro – RBMC, RBMC-IP (RBMC em Tempo Real – *Internet Protocol*), GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, LISN, IGS e ICEA – cujos dados são utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, são apresentadas a seguir. Juntas elas possuem aproximadamente 250 estações, das quais 109 também transmitem os dados em tempo real.

A Figura 12 apresenta a localização das estações das redes ativas que disponibilizam dados pós-processados (RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, LISN, IGS e ICEA) e a Figura 13 a localização das estações que transmitem dados em tempo real (RBMC-IP e GNSS-SP).

Figura 12 – Localização das estações das redes ativas que disponibilizam dados pós-processados (RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, LISN, IGS e ICEA).

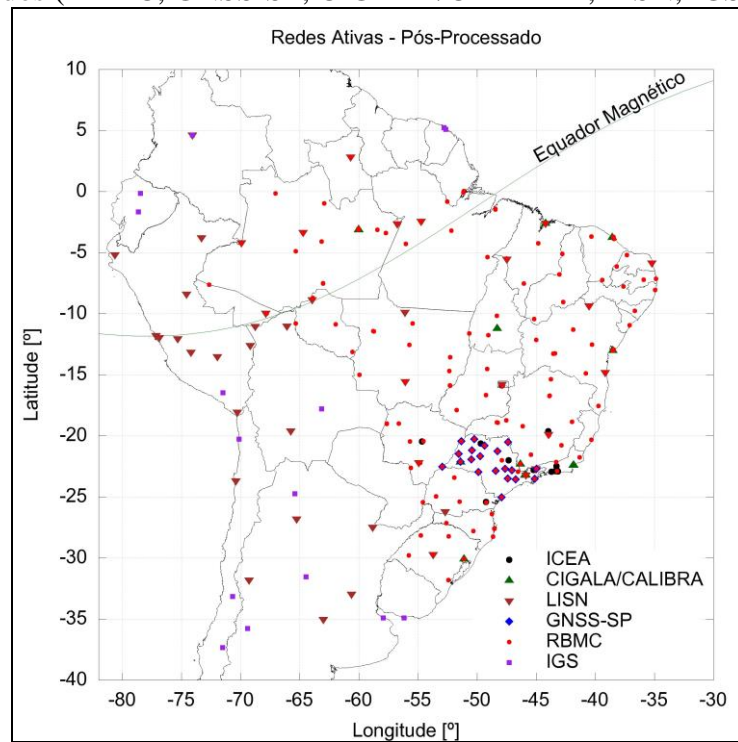
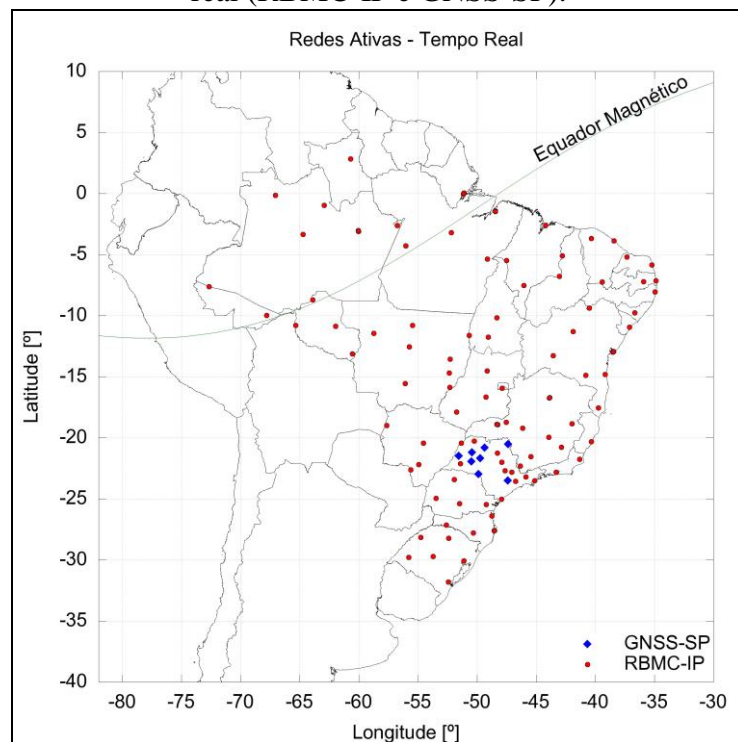


Figura 13 – Localização das estações das redes ativas que disponibilizam dados em tempo real (RBMC-IP e GNSS-SP).



A rede CIGALA/CALIBRA é uma rede dedicada exclusivamente ao estudo e monitoramento dos distúrbios ionosféricos no Brasil. Resultante da instalação de receptores

PolaRxS-PRO da Septentrio durante o desenvolvimento dos projetos CIGALA (finalizado em fevereiro de 2012) e CALIBRA (finalizado em fevereiro de 2015), a rede é composta atualmente por 11 estações, sendo que houve 10 estações temporárias.

A rede GNSS-SP é composta por 20 estações, sendo todas homologadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Implantadas durante o desenvolvimento do projeto temático junto a FAPESP (processo n° 2006/04008-2), finalizado em julho de 2013, a rede é utilizada para estudos atmosféricos, bem como para o posicionamento relativo e RTK, graças à disponibilização dos dados em tempo real por meio do protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*).

A RBMC, mantida pelo IBGE, conta com 138 estações (em 12 de julho de 2018) espalhadas pelo território brasileiro. Cento e quatro dessas estações também transmitem dados em tempo real, formando a RBMC-IP. Ressalta-se que 25 estações da RBMC já foram substituídas por outras estações ou desativadas.

A rede de sensores ionosféricos de baixa latitude (LISN) possui 50 receptores GPS, cinco ionossondas e cinco magnetômetros distribuídos pela América do Sul, principalmente nas proximidades do equador magnético e do meridiano de 70°W. A LISN é um projeto internacional que monitora a baixa, média e alta atmosfera na região equatorial, com o propósito de estudar e prever fenômenos ionosféricos (LISN, 2018).

A rede IGS é composta por mais de 500 estações geodésicas permanentes distribuídas por toda a superfície da Terra, operando continuamente e coletando dados GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou/Compass, QZSS e SBAS. Ressalta-se que nem todas as estações coletam os sinais de todos os sistemas. Nove estações IGS estão localizadas no Brasil, sendo as mesmas pertencentes à RBMC: BRAZ, BRFT, CHPG, POVE, RECF, SALU, SAVO, SPTU e UFPR (IGS, 2018a). Nos outros países sul-americanos, há mais 18 estações IGS.

Por fim, o ICEA, em parceria com algumas instituições de pesquisa, como INPE, ITA, IAE e a FCT/UNESP, implantou uma rede com 10 receptores GNSS, sendo denominada de rede ICEA. Os receptores das estações são do tipo PolaRxS-PRO da Septentrio e NETR8 da Trimble. Os mesmos estão instalados, principalmente, próximo ao aeroporto internacional do Rio de Janeiro. O intuito da instalação das estações de monitoramento no entorno do aeroporto do Galeão é prover um conjunto de dados de direção de propagação das bolhas ionosféricas, com a possibilidade futura de implementar um sistema de alerta antecipado para o aeroporto sobre a presença de estruturas ionosféricas, que podem colocar em risco a segurança da operação de um sistema baseado na tecnologia GNSS (ICEA, 2013).

3 IONOSFERA, IRREGULARIDADES E CINTILAÇÕES

Medições do campo geomagnético terrestre realizadas no início do século XX mostraram variações periódicas das linhas de força, levando a comunidade científica na época a indagar sobre a existência de uma camada ionizada na parte superior da atmosfera terrestre (KIRCHHOFF, 1991). Somente em 1926 é que o termo “ionosfera” foi utilizado pela primeira vez pelo cientista britânico Robert A. Watson-Watt, quando o mesmo submeteu uma correspondência ao *British Radio Research Board* (McNAMARA, 1991).

O extrato superior da Terra é ionizado devido à radiação eletromagnética e corpuscular do Sol. Assim, conceitos relacionados ao Sol são importantes para uma melhor compreensão de alguns fenômenos que ocorrem na camada ionosférica.

3.1 Fonte Solar de Ionização

O processo de ionização da ionosfera terrestre é devido à radiação eletromagnética proveniente de três camadas atmosféricas do Sol: fotosfera, cromosfera e corona (também denominada de coroa) (KIRCHHOFF, 1991).

A corona é a camada mais externa e que possui as temperaturas mais elevadas. Da fotosfera, que apresenta espessura de cerca de 300 km, se origina a radiação mais intensa, situada na frequência do visível do espectro eletromagnético. Já a cromosfera, situada entre a fotosfera e a corona, tem espessura aproximada de 15.000 km, sendo a radiação proveniente dessa camada muito mais fraca do que a da fotosfera (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2000).

O Sol também emite um fluxo contínuo de partículas carregadas eletronicamente, denominado de vento solar, formado por, em média, 50,9% de elétrons, 47,3% de prótons e 1,8% de He^{2+} (GUIMARÃES; SILVA, 2003). Não é possível notar o vento solar na superfície terrestre, pois sua densidade é muito baixa (McNAMARA, 1991). No entanto, sendo as partículas carregadas eletricamente, as mesmas afetam o campo geomagnético da Terra e a camada ionosférica.

Dessa forma, a radiação eletromagnética, bem como o vento solar, enviam para a Terra energia, que por sua vez contribui para a formação da ionosfera (KIRCHHOFF, 1991). Enquanto o vento solar possui uma velocidade aproximada de 400 km/s, a radiação se propaga com a velocidade da luz no vácuo (McNAMARA, 1991).

Essas duas fontes de ionização são suscetíveis a várias alterações devidas às tempestades solares. Uma tempestade solar caracteriza-se pelo aumento significativo da radiação eletromagnética, da velocidade e da concentração do vento solar (KIRCHHOFF, 1991). No instante em que a radiação e as partículas do vento atingem a Terra, podem ocorrer as tempestades geomagnéticas e ionosféricas. Essas tempestades interferem significativamente no comportamento da ionosfera.

3.2 Estratificação da Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação de ondas eletromagnéticas (SEEBER, 2003), por exemplo. A Figura 14 esquematiza a estratificação da atmosfera e os respectivos intervalos aproximados de altura.

Figura 14 – Estratificação da atmosfera terrestre.

Altura [km]	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação
100.000	Termosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera
10.000		Ionosfera		
1.000	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera
100				
10	Estratosfera			
	Troposfera			

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

A divisão da atmosfera em relação à propagação de ondas eletromagnéticas, em troposfera e ionosfera, é a considerada nessa tese, pois, ao se propagarem nessas camadas, os sinais GNSS sofrem diferentes influências.

A camada compreendida entre a superfície física da Terra e, aproximadamente, 50 km de altura é a troposfera, constituída por partículas neutras (SEEBER, 2003). A maior concentração de gases está localizada até uma altura de 12 km, composta por oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, vapor d'água, entre outros elementos

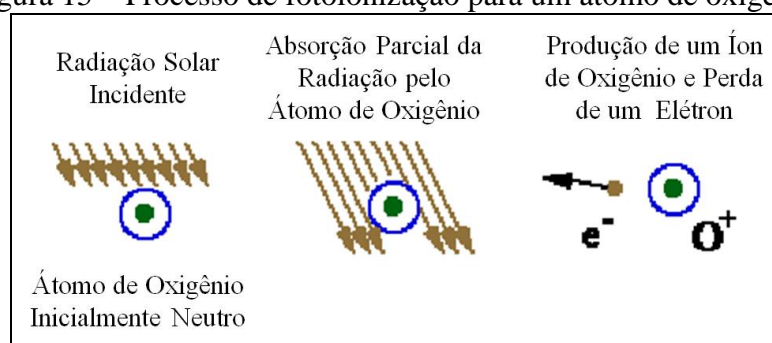
químicos (SAPUCCI, 2001). Nessa camada, a propagação do sinal depende exclusivamente do conteúdo do vapor d'água, da temperatura e da pressão atmosférica, desde que a frequência do sinal transmitido seja inferior a 30 GHz, caracterizando assim um meio não dispersivo para os sinais GNSS (LEICK, 1995). Já a camada superior da atmosfera, entre 50 e 1.000 km de altura, aproximadamente, dispersiva para os sinais GNSS, é a ionosfera. A fronteira superior da ionosfera não é bem definida, pois a mesma pode ser interpretada como uma zona de transição com a plasmasfera.

3.3 Formação e Características da Camada Ionosférica

A ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, meio em que a propagação dos sinais depende da frequência (LIN, 1997). Composta por partículas livres carregadas (íons e elétrons), a formação da ionosfera está relacionada, principalmente, com a radiação solar eletromagnética e com a radiação corpuscular incidente na atmosfera terrestre e, com menor importância, com a radiação cósmica (FEDRIZZI, 1999).

No instante em que a radiação solar eletromagnética incide sobre a atmosfera neutra, ocorre uma grande produção de íons e elétrons livres por meio do processo de fotoionização (EL GIZAWY, 2003; McNAMARA, 1991). A Figura 15 esquematiza o processo de fotoionização para um átomo de oxigênio.

Figura 15 – Processo de fotoionização para um átomo de oxigênio.



Fonte: Adaptado de El Gizawy (2003).

A colisão de partículas carregadas provenientes do vento solar e dos raios cósmicos também produz íons e elétrons livres. A recombinação consiste no processo inverso da fotoionização, sendo esse o principal processo em que elétrons livres são perdidos no extrato superior da ionosfera (McNAMARA, 1991).

À medida que a radiação solar eletromagnética penetra a atmosfera terrestre mais densa, a produção de elétrons aumenta até uma altura onde a densidade de elétrons é máxima. Abaixo dessa altura, apesar do aumento na densidade da atmosfera neutra, a produção de elétrons diminui, pois a maior parte da radiação já foi absorvida e a taxa de perda predomina sobre a taxa de produção (FEDRIZZI, 1999).

A ionosfera é dividida em três camadas, representadas pelas letras D, E e F (MATSUOKA, 2007; FEDRIZZI, 1999; DAVIES, 1990). Essas camadas são caracterizadas pelas variações da densidade de elétrons em função da altura. A camada D consiste na região da ionosfera entre 50 e 90 km de altura (DAVIES, 1990), possuindo como fontes primárias de ionização a radiação *Lyman- α* , a radiação cósmica e o raio-X (LIU, 2004). Essa camada é influenciada, principalmente, pela radiação solar. O nível de densidade de elétrons livres é maior durante o dia, ao contrário da noite, quando a densidade atinge o nível mais baixo. De acordo com Davies (1990), a camada D é importante para a propagação de ondas, atuando como uma fonte refletora dos sinais de baixa frequência, nas faixas VLF (*Very Low Frequency*), de 10 a 30 kHz, e LF (*Low Frequency*), de 30 a 300 kHz.

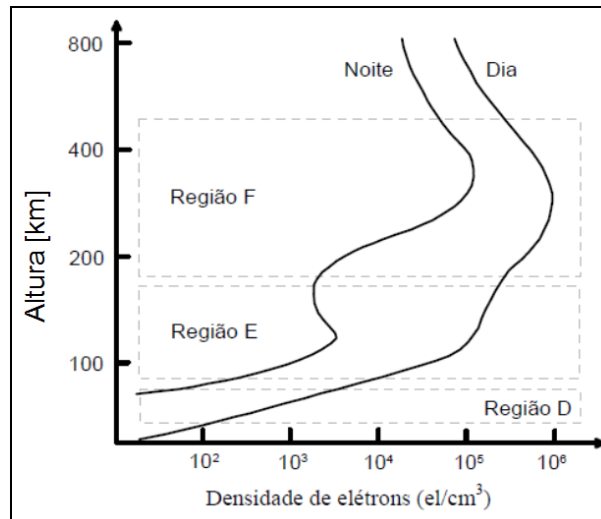
A próxima camada da ionosfera é a E, compreendida entre 90 e 140 km de altura. O comportamento dessa camada depende do nível de atividade solar e do ângulo zenital do Sol. Esta camada é, geralmente, livre de distúrbios e está presente somente durante o dia. Em relação à fonte primária de ionização, tem-se que a radiação solar eletromagnética na faixa do raio-X é a principal (DAVIES, 1990).

Já a camada F corresponde ao intervalo de altura entre 140 e 1.000 km, sendo subdividida em outras duas camadas, a F1 e F2. A camada F1 é compreendida entre 140 a 200 km de altura, aproximadamente, e apresenta uma típica concentração de elétrons variando de $2,3 \times 10^{11}$ a $3,3 \times 10^{11}$ elétrons/m³ devido à atividade solar. Durante o período noturno, essa região completamente desaparece, pois a densidade de elétrons é controlada principalmente pelo ângulo zenital solar. A fonte primária de ionização é a radiação solar do extremo ultravioleta. Por outro lado, a camada F2 corresponde ao intervalo da ionosfera entre as alturas de 200 e 1.000 km. É nessa região que ocorre o pico máximo de densidade de elétrons, geralmente entre 300 e 450 km de altura. A radiação ionizante dessa camada é a mesma responsável pela ionização da camada F1, porém, a F2 não segue a mesma variação diurna e sazonal (DAVIES, 1990).

A densidade eletrônica apresenta um comportamento distinto entre os períodos diurno e noturno. Essa diferença é devida à queda da quantidade de elétrons durante

o período noturno, quando não há radiação solar. A Figura 16 mostra essa diferença de densidade durante o dia e a noite nas três camadas ionosféricas.

Figura 16 – Densidade média de elétrons durante o dia e a noite nas camadas ionosféricas D, E e F.



Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1997) apud Rodrigues (2003).

Sobre o comportamento da ionosfera vários fatores influenciam, como a localização geográfica, a estação do ano (outono, inverno, primavera e verão), o nível de atividade solar e geomagnética, bem como, as variações dia a dia.

3.4 Conteúdo Total de Elétrons

Um dos parâmetros que descrevem o efeito da ionosfera nos sinais GNSS é o TEC, o qual representa o número de elétrons contidos no caminho percorrido pelo sinal, do satélite ao receptor.

A unidade do TEC é elétrons/m². Entretanto, como os valores apresentam uma ordem de grandeza elevada, adota-se como unidade convencional o TECU (*TEC Unit*), equivalente a 1×10^{16} elétrons/m².

O TEC pode ser convertido em erro na distância medida pelo código (I_{rg}^s) ou pela fase (I_{rf}^s), nas frequências das portadoras L1, L2 e L5, utilizando as equações (5) e (6), respectivamente:

$$I_{rg}^s = \frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (5)$$

$$I_{rf}^s = -\frac{40,3}{f^2} \text{TEC} \quad (6)$$

Verifica-se que os erros devido à ionosfera para o código e para a fase são de mesma magnitude, porém, de sinais contrários. Ambos são proporcionais ao TEC e inversamente proporcionais ao quadrado da frequência. Por exemplo:

- Portadora L1: 1 TECU \approx erro na distância de $\pm 0,162$ m;
- Portadora L2: 1 TECU \approx erro na distância de $\pm 0,267$ m; e
- Portadora L5: 1 TECU \approx erro na distância de $\pm 0,291$ m.

O conteúdo total de elétrons pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias advindas dos códigos em L1 e L2 (PD_{rL1}^s, PD_{rL2}^s), a partir da combinação linear apresentada pela equação (7) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004). Pode-se também estimar o TEC utilizando as portadoras L1 e L5; nesse caso deve-se trocar o subscrito (L_2) por (L_5) na equação.

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \left[(PD_{rL2}^s - PD_{rL1}^s) - v_{PD} \right] \quad (7)$$

onde:

f_{L1} – frequência da portadora L1;

f_{L2} – frequência da portadora L2; e

v_{PD} – erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

A estimativa do TEC também pode ser determinada a partir da combinação linear entre as medidas de fase das portadoras L1 e L2 ($\Phi_{rL1}^s, \Phi_{rL2}^s$), dada pela equação (8) (MATSUOKA; CAMARGO, 2004), ou entre as medidas de fase das portadoras L1 e L5.

$$\text{TEC}_r^s = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \left[(\lambda_{L2} \Phi_{rL2}^s - \lambda_{L1} \Phi_{rL1}^s) - (\lambda_{L1} N_{rL1}^s - \lambda_{L2} N_{rL2}^s) - v_{\Phi} \right] \quad (8)$$

onde:

λ_{L1} – comprimento de onda da portadora L1;

λ_{L2} – comprimento de onda da portadora L2;

N_{rL1}^s – ambiguidade da fase da portadora L1;

N_{rL2}^s – ambiguidade da fase da portadora L2; e

v_ϕ – erros sistemáticos não eliminados na combinação linear e erros aleatórios.

Os valores de TEC estimados por meio da pseudodistância são aproximadamente 10 vezes ou mais ruidosos do que os obtidos utilizando a fase da portadora (SKONE, 1998). Isso se deve a magnitude da precisão da pseudodistância ser de ordem métrica, ao contrário da fase que é de ordem centimétrica a milimétrica (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

Com relação ao estado da ionosfera, diversas variações são observadas no seu comportamento, tais como: variações diárias e sazonais, ciclos de longos períodos, variações com a atividade geomagnética, influências da latitude, longitude, entre outras (MATSUOKA, 2007; LEICK, 1995). Nas subseções a seguir são abordadas cada uma dessas variações.

3.4.1 Variações diárias e sazonais

As variações temporais da densidade de elétrons na ionosfera podem ser classificadas em variações diárias, sazonais e ciclos de longos períodos (ciclos solares) (CAMARGO, 1999).

As variações diárias ocorrem devido a mudanças que acontecem em determinados locais da ionosfera, no entanto desaparecem no período noturno devido à recombinação. Há a variação diária simplesmente devido à iluminação do Sol, ou seja, devido à radiação solar eletromagnética. No transcorrer do dia a densidade eletrônica depende da hora local, atingindo um valor máximo entre 12h e 16h (WEBSTER, 1993). Um segundo máximo acontece na região de baixas latitudes, logo após o ocaso do Sol, entre 21h e 22h local, devido à formação da AIE (McNAMARA, 1991; DAVIES, 1990).

As variações sazonais são devidas a variações na densidade de elétrons durante os meses do ano, sendo o fator gerador a variação sazonal da declinação do Sol (McNAMARA, 1991). Para o território brasileiro, os menores valores de densidade de

elétrons ocorrem, geralmente, nos meses próximos ao solstício de inverno, e os maiores valores nos meses de março, abril, maio, setembro e outubro (próximo aos equinócios de outono e primavera) e nos meses que precedem e antecedem o solstício de verão.

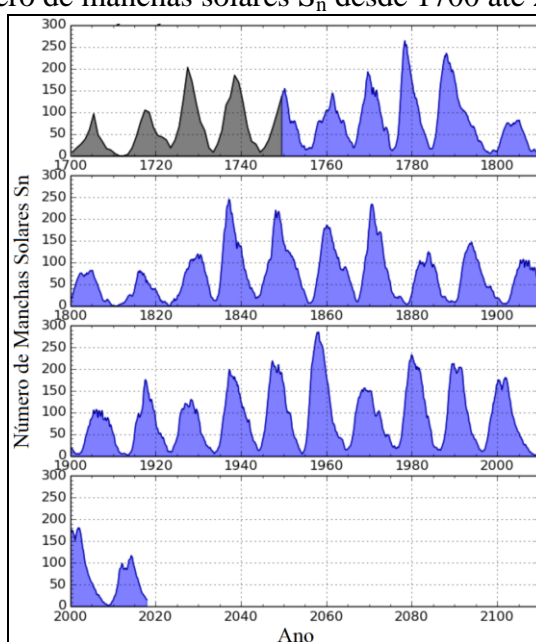
3.4.2 Variações com os ciclos solares

As variações de ciclos de longos períodos correspondem a ciclos de, aproximadamente, 11 anos e estão relacionadas à ocorrência de manchas solares, sendo o aumento da ionização da camada ionosférica dependente do aumento do número de manchas.

Manchas solares são regiões frias e escuras que surgem na superfície do Sol, rodeadas por áreas brilhantes que emitem um nível elevado de radiação ultravioleta. Dessa forma, o aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera (McNAMARA, 1991). A duração de uma mancha solar não é constante; algumas manchas podem surgir por apenas alguns dias, enquanto outras podem permanecer por várias rotações solares, cujo período aproximado é de 27 dias (SCHAER, 1999).

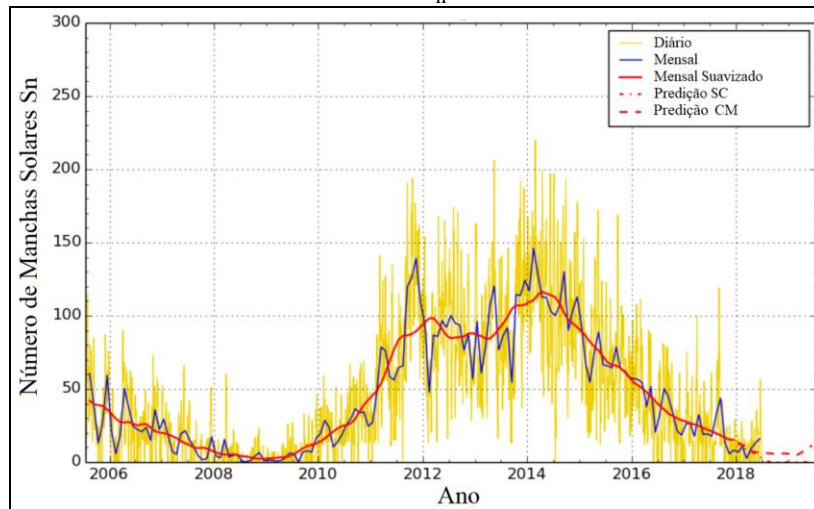
A Figura 17 apresenta os registros de manchas solares desde 1700 até 2 de julho de 2018. Ressalta-se que, de 1700 a 1750, as médias dos números de manchas foram anuais (em preto), ao passo que de 1750 até o presente a contagem do número de manchas é dada pela média mensal (em azul). Atualmente, ocorre o declínio do ciclo 24 (Figura 18).

Figura 17 – Número de manchas solares S_n desde 1700 até 2 de julho de 2018.



Fonte: Adaptado de <<http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

Figura 18 – Número de manchas solares S_n do fim do ciclo 23 e do atual ciclo 24.

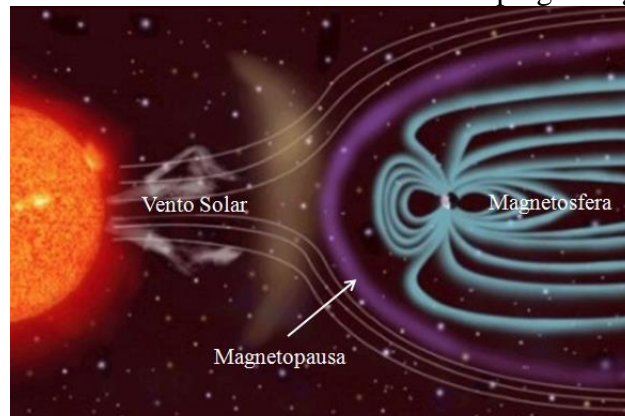


Fonte: Adaptado de <<http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

3.4.3 Variações com a atividade geomagnética

Na ionosfera, as linhas de campo geomagnético controlam os movimentos das partículas ionizadas e, portanto, qualquer perturbação no campo proporcionará alterações nas condições de transporte do meio ionizado. As alterações mais comuns percebidas são aquelas produzidas por meio das correntes elétricas que fluem na parte inferior da ionosfera. Podem ocorrer também alterações bruscas e intensas, provocadas pelas explosões solares (KIRCHHOFF, 1991). Ressalta-se que, sob a influência de intensos eventos solares, que proporcionam fortes ventos solares, as linhas do campo geomagnético são comprimidas, exercendo grande influência na ionosfera terrestre, podendo ocasionar as tempestades geomagnéticas, que por sua vez originam as tempestades ionosféricas (FEDRIZZI, 2003). A Figura 19 mostra a influência do vento solar no campo geomagnético.

Figura 19 – Influência do vento solar no campo geomagnético.

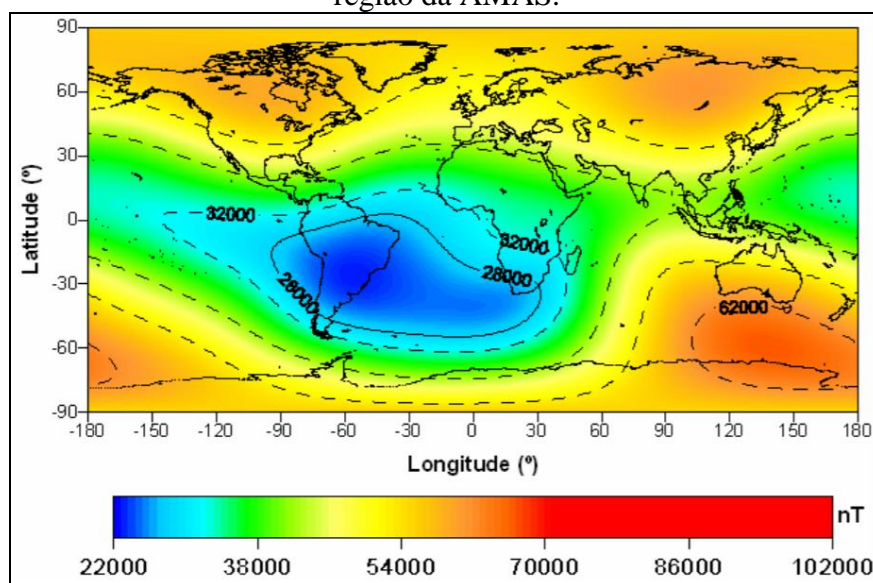


Fonte: Adaptado de <<http://sci.esa.int/cluster/36645-solar-wind/>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

A velocidade do vento solar pode superar 400 km/s e atingir mais de 1.000 km/s durante eventos solares intensificados. Dependendo do grau de intensidade da perturbação, o limite da magnetopausa (linha de contorno da magnetosfera) é comprimido, de dez para seis raios terrestres (BATISTA, 2003).

O campo geomagnético também apresenta algumas anomalias regionais, sendo uma delas a AMAS, que se tornou notória a partir de mapas magnéticos do início do século 20 (CHAPMAN; BARTELS, 1940). A região da AMAS caracteriza-se por apresentar baixas intensidades no campo geomagnético, coincidindo com uma região de intensa radiação eletromagnética próximo à Terra. É, portanto, uma “janela” à penetração de partículas cósmicas na magnetosfera (HARTMANN, 2005). Em 2005, a Anomalia Magnética do Atlântico Sul apresentava uma forma alongada, estendendo-se da América do Sul até a África, agindo principalmente sobre o território brasileiro e com o seu centro localizado no interior do Paraguai, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Campo geomagnético total para o ano de 2005, sendo o contorno de 28000 nT a região da AMAS.



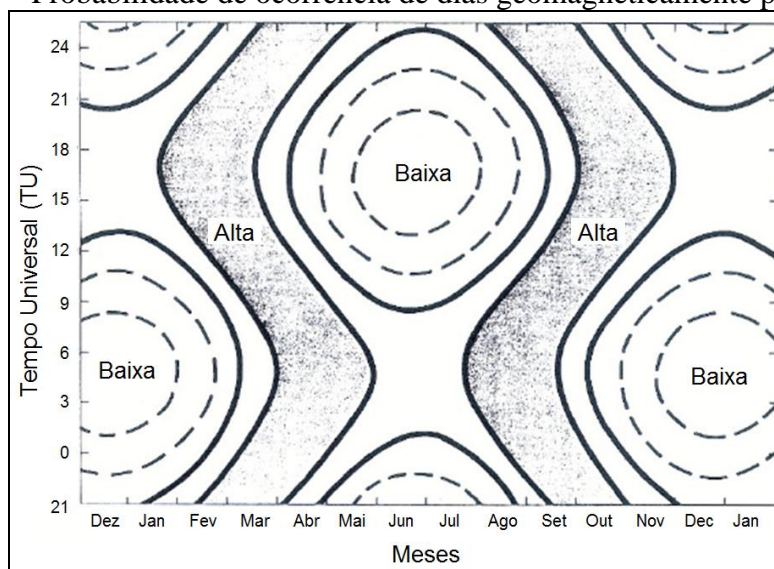
Fonte: Hartmann (2005).

O aumento do fluxo de partículas cósmicas na magnetosfera pode provocar interferências em objetos que orbitam a Terra, tais como satélites e estações espaciais. Efeitos também são percebidos na superfície terrestre, como por exemplo, problemas na transmissão e recepção de dados de satélites (HATMANN, 2005). Para mais informações sobre a AMAS, pode-se consultar Abdu et al. (2005).

Os eventos solares que causam tempestades geomagnéticas são: explosões solares, correntes de vento solar de alta velocidade proveniente de buracos na corona e desaparecimentos súbitos de filamentos (SDF – *Sudden Disappearing Filaments*). De acordo com Gonzalez et al. (1994), os SDF e as explosões solares são fenômenos típicos de períodos de alta atividade solar, ao passo que os buracos na corona ocorrem com maior frequência durante períodos de baixa e média atividade. Os filamentos são grandes estruturas relativamente fria na cromosfera solar, que desaparecem subitamente impulsionando material do filamento em direção ao meio interplanetário, similarmente ao efeito de uma explosão solar (McNAMARA, 1991). O súbito desaparecimento de filamento pode afetar o campo geomagnético da Terra e, conseqüentemente, a ionosfera.

A rotação da Terra sobre o seu eixo proporciona situações nas quais o eixo do campo geomagnético torna-se perpendicular à direção do vento solar. Isto acarreta uma variação da probabilidade de ocorrência de dias geomagneticamente perturbados por um período de 24h (THOMPSON, 1985 apud McNAMARA, 1991), conforme mostrado na Figura 21. A probabilidade de ocorrência de dias geomagneticamente perturbados é alta nas duas áreas mais escuras da Figura 21 e baixa nas demais áreas.

Figura 21 – Probabilidade de ocorrência de dias geomagneticamente perturbados.



Fonte: Adaptado de McNamara (1991).

Com base na Figura 21, nota-se que os efeitos geomagnéticos de uma explosão solar, vento solar de alta velocidade ou SDF serão maiores durante os equinócios do que durante os solstícios.

Para descrever em escala planetária a intensidade das tempestades geomagnéticas utiliza-se, por exemplo, os índices geomagnéticos D_{st} (*Disturbance Storm-Time*) e K_p (*Planetarische Kennziffer*) (FEDRIZZI, 2003). A classificação de uma tempestade geomagnética com base no índice D_{st} é apresentada na Tabela 7. Já a classificação da atividade geomagnética com base no índice K_p é fornecida na Tabela 8.

Tabela 7 – Classificação de uma tempestade geomagnética em função do índice D_{st} .

Condição da Tempestade Geomagnética	Índice D_{st} [nT]
Fraca	$D_{st} > -50$
Moderada	$-50 > D_{st} > -100$
Intensa	$-100 > D_{st} > -300$
Superintensa	$D_{st} < -300$

Fonte: Gonzalez et al. (1999).

Tabela 8 – Classificação da atividade geomagnética em função do índice K_p .

Atividade Geomagnética	Índice K_p
Calma	0 – 2
Transição	3
Ativo	4
Tempestade Fraca	5
Tempestade Intensa	6
Tempestade Muito Intensa	7 – 9

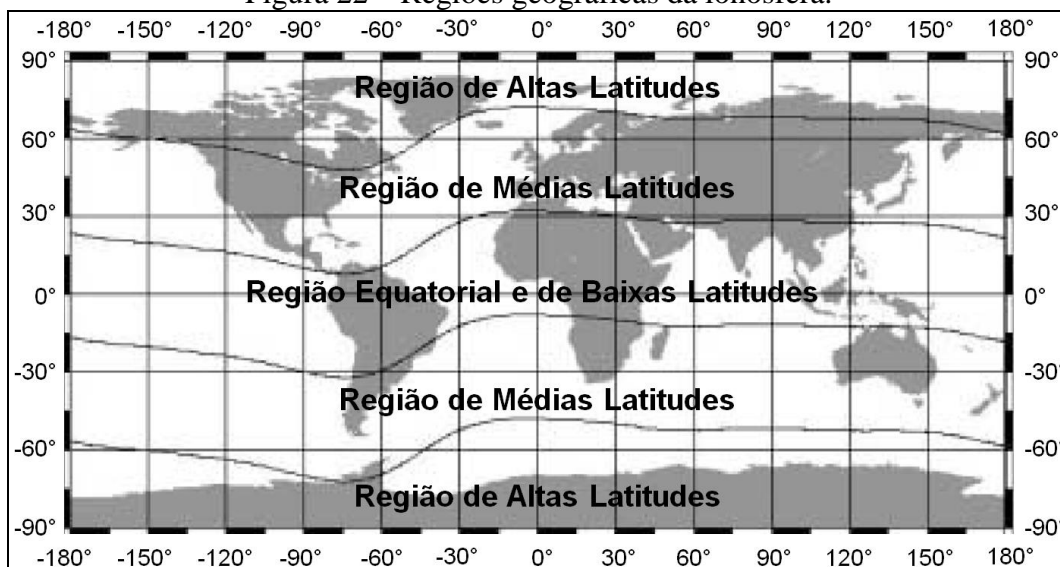
Fonte: Batista (2003).

Valores dos índices D_{st} e K_p podem ser consultados, por exemplo, em <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>, os quais são disponibilizados pelo *World Data Center for Geomagnetism da Kyoto University/Japão*.

3.4.4 Regiões geográficas da ionosfera

Apesar da impossibilidade de delimitar, exatamente, as regiões geográficas da ionosfera em termos de latitude, Fonseca Junior (2002) apresenta, aproximadamente, as regiões e suas respectivas amplitudes (Figura 22).

Figura 22 – Regiões geográficas da ionosfera.



Fonte: Adaptado de Fonseca Junior (2002).

A região de altas latitudes está delimitada entre $(-90^\circ, -60^\circ)$ e $(+60^\circ, +90^\circ)$, a região de médias latitudes entre $(-60^\circ, -20^\circ)$ e $(+20^\circ, +60^\circ)$ e a região equatorial e de baixas latitudes entre $\pm 20^\circ$. Os limites dessas regiões não são definidos arbitrariamente, mas selecionados em função da evidência de regiões com processos ionosféricos relativamente homogêneos (FONSECA JUNIOR, 2002).

A região de médias latitudes é caracterizada por apresentar um comportamento menos variável do que as demais regiões. Além disso, é a que mais se aproxima dos modelos ionosféricos clássicos (RODRIGUES, 2003). No entanto, na ocorrência de severas tempestades geomagnéticas, as irregularidades na densidade de elétrons que ocorrem na região de altas latitudes podem se estender para as regiões de médias latitudes, impactando assim os sinais GNSS. Efeitos de cintilação ionosférica podem, às vezes, serem detectados nessa região; embora sejam mais frequentes nas regiões equatorial, de baixas e de altas latitudes.

Caracterizada por ser muito variável espacialmente e temporalmente (McNAMARA, 1991), a região de altas latitudes engloba as zonas polar, auroral e sub-região auroral (EL GIZAWY, 2003). Durante a precipitação de partículas, que provoca o aumento da densidade de elétrons, mudanças da ordem de dezenas de TECU podem ocorrer nas altas latitudes (SCHLEGEL, 2007 apud DAL POZ, 2010).

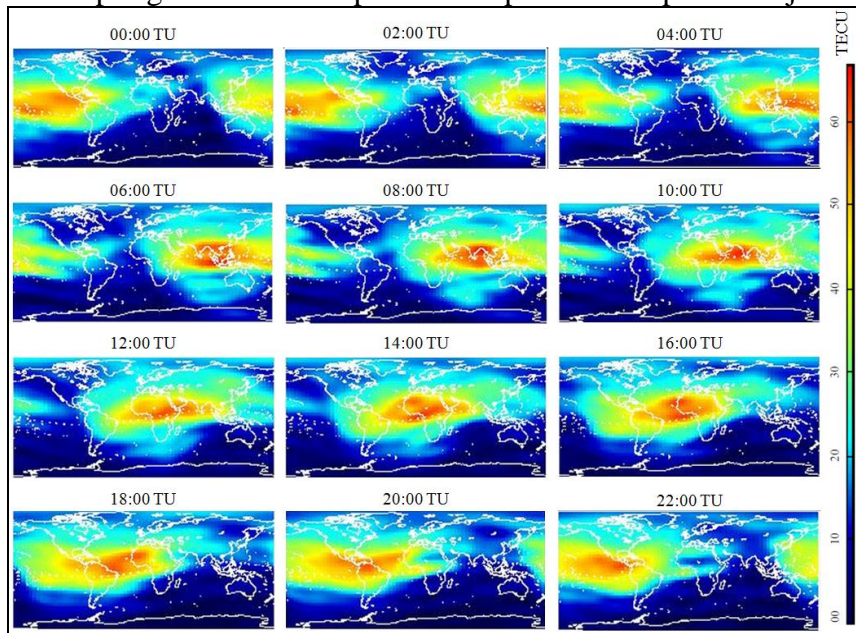
Por fim, tem-se a região equatorial (entre as latitudes geomagnéticas de $\pm 5^\circ$) e de baixas latitudes, entre $(-20^\circ, -5^\circ)$ e $(+5^\circ, +20^\circ)$ (BATISTA, 2003). A atividade da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é altamente correlacionada com a hora local,

iniciando seu desenvolvimento por volta das 6h-7h, atingindo sua atividade máxima às 14h-15h, e apresentando os maiores valores de TEC da Terra. Um segundo máximo pode ocorrer em torno das 21h na região de baixas latitudes, apresentando, assim, altos gradientes de TEC na direção norte-sul (WANNINGER, 1993). Os efeitos de cintilação ionosférica também estão presentes nessas duas regiões, sendo os efeitos maiores do que na região de altas latitudes (EL GIZAWY, 2003).

Um dos principais fenômenos da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é a AIE proveniente do efeito fonte (APPLETON, 1946 apud MATSUOKA, 2007). Os campos elétricos do dínamo atmosférico que são gerados na região E são transmitidos ao longo das linhas de campo geomagnético para a região F, devido à alta condutividade paralela (BATISTA, 2003). Durante o dia, o campo elétrico (E) é direcionado para leste. Na região F equatorial, um campo elétrico para leste, na presença do campo magnético (B) que é dirigido para norte causa uma deriva eletromagnética para cima, dada por $E \times B / B^2$ (BATISTA, 2003). Após a elevação do plasma até elevadas alturas na região equatorial, o mesmo inicia um movimento de descida ao longo das linhas do campo geomagnético. Esse movimento ocorre devido à ação da gravidade (\bar{g}) e gradientes de pressão (∇p). Esse mecanismo de elevação do plasma na região equatorial e posterior descida ao longo das linhas do campo geomagnético até baixas latitudes é conhecido como efeito fonte (RODRIGUES, 2003).

A consequência da combinação dos movimentos de ascendência e descendência do plasma é que duas regiões de picos de densidade de elétrons são formadas nas regiões subtropicais ao norte e ao sul do equador magnético, entre (-20°, -10°) e (+10°, +20°) de latitude geomagnética. Na região do equador magnético, a ionização é menos intensa, resultando em gradientes de TEC na direção norte-sul. Tal distribuição latitudinal de ionização é denominada de AIE ou Anomalia de Appleton (APPLETON, 1946 apud MATSUOKA, 2007). Com o intuito de visualizar a anomalia, apresenta-se na Figura 23 uma sequência de mapas globais de TEC produzidos pelo CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*) para o dia 3 de julho de 2012. A AIE está representada pelas áreas vermelhas e amarelas dos mapas, caracterizadas por uma maior densidade de elétrons.

Figura 23 – Mapas globais de TEC produzidos pelo CODE para 3 de julho de 2012.



Fonte: Adaptado de <<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim0.jpg>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

A AIE varia no decorrer do dia, passando por um primeiro máximo na densidade de elétrons por volta das 14h local e por um segundo máximo, geralmente maior que o primeiro, nas horas que precedem a meia noite, normalmente próximo das 21h local. Esse segundo máximo, às vezes, não ocorre durante períodos de baixa atividade solar.

3.5 Irregularidades Ionosféricas e Índices

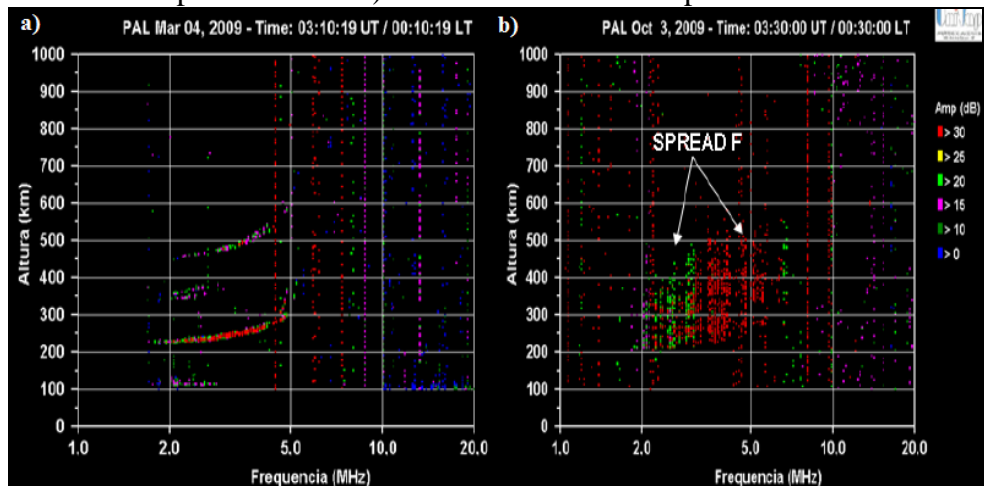
As irregularidades ionosféricas são perturbações na densidade do plasma ionosférico, que surgem por meio de processos de instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor (R-T) que ocorrem na região equatorial e de baixas latitudes.

A instabilidade R-T dá origem às irregularidades na camada F com um amplo espectro de escalas de tamanho, desde centenas de quilômetros a alguns centímetros. Esse fenômeno, de irregularidades na ionosfera e respectiva manifestação em dados coletados pelos mais diversos tipos de equipamentos, é denominado normalmente de Camada F Espalhada (ESF – *Equatorial Spread F*), nome designado devido ao espalhamento nos traços de ionogramas equatoriais e de baixas latitudes causado pelas irregularidades ionosféricas (RODRIGUES, 2003). Ressalva-se que as observações das irregularidades possuem outras nomenclaturas, dependendo do tipo de equipamento utilizado para o monitoramento, como por exemplo: *spread F* tipo *range* (variação em altura) e *spread F* tipo frequência (variação em frequência) quando o equipamento é uma ionossonda, flutuações de fase ou taxas de

variações do TEC quando se utiliza um receptor GNSS, depleções ou bolhas de plasma quando se emprega um imageador óptico, dentre outras (ABREU, 2012).

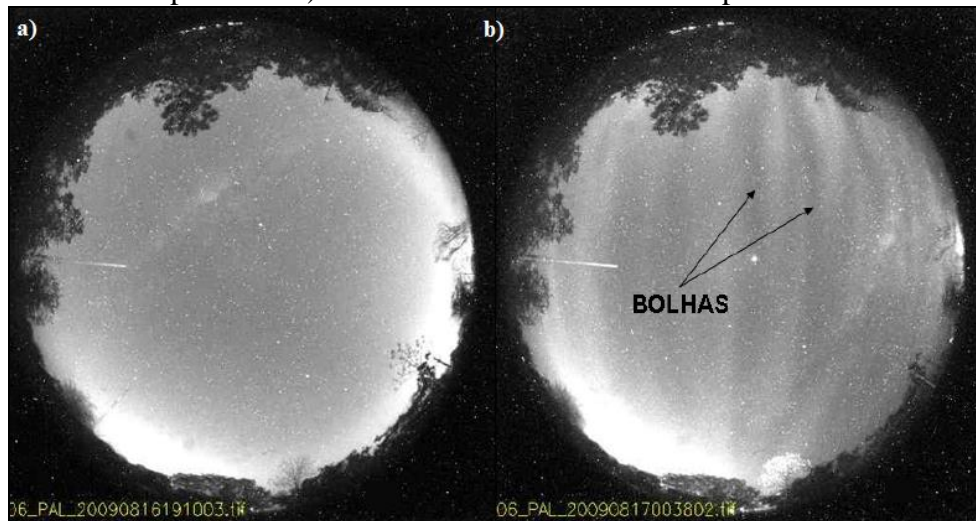
As Figuras 24, 25 e 26 apresentam, para fins exemplificativos, a ocorrência e a não ocorrência de irregularidades ionosféricas, obtidas com uso de ionossonda digital, imageador *all-sky* e receptor GNSS, respectivamente.

Figura 24 – Ionogramas de ionossonda digital em Palmas/TO, a) sem a ocorrência de espalhamento e b) com a ocorrência de espalhamento.



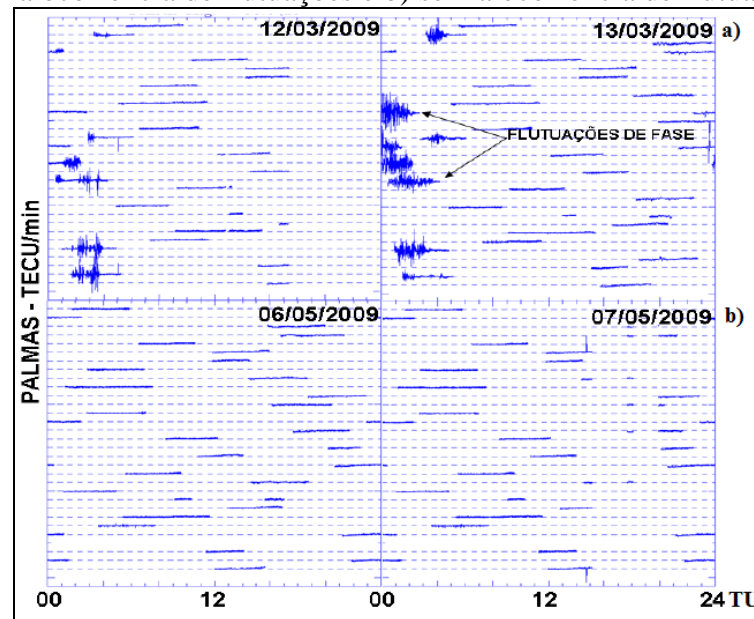
Fonte: Abreu (2012).

Figura 25 – Imagens do imageador *all-sky* em Palmas/TO, a) sem a ocorrência de bolhas de plasma e b) com a ocorrência de bolhas de plasma.



Fonte: Abreu (2012).

Figura 26 – Flutuações de fase provenientes de dados de receptor GNSS em Palmas/TO, a) com a ocorrência de flutuações e b) sem a ocorrência de flutuações.

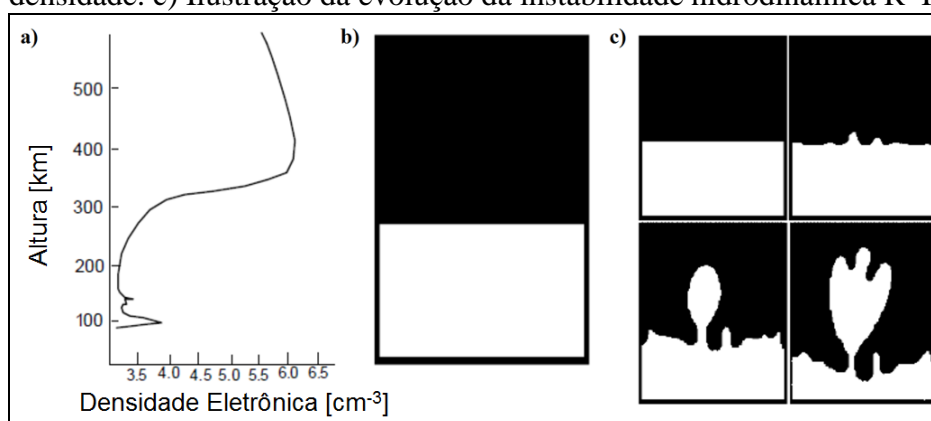


Fonte: Abreu (2012).

Dungey (1956) apud Rodrigues (2003) foi o primeiro a sustentar a teoria da instabilidade R-T como processo gerador da ESF. Entretanto, essa teoria foi temporariamente rejeitada, pois explicava apenas a geração de estruturas na parte inferior do perfil de densidade de plasma da camada F. Com o advento de novos experimentos e estudos, a teoria da instabilidade R-T foi aprimorada, incluindo parâmetros do ambiente ionosférico, como o campo elétrico ambiente e a ação de ventos neutros, sendo denominada de teoria da instabilidade R-T generalizada, no qual muitas das peculiaridades da ESF podem ser explicadas (RODRIGUES, 2003).

Um perfil vertical típico da ionosfera na região equatorial para o período do pôr do Sol é apresentado na Figura 27a. Observa-se uma acentuada variação da densidade eletrônica na base da camada F, dividindo-a em duas regiões distintas: uma de alta densidade (acima de 350 km de altura) e outra de baixa densidade (abaixo de 350 km). Para fins didáticos, pode-se realizar uma analogia desse perfil com o caso da instabilidade hidrodinâmica R-T, onde um fluido mais denso é suportado por outro menos denso, como mostra a Figura 27b. Na instabilidade hidrodinâmica R-T uma pequena perturbação surge na superfície de contato dos dois fluidos e, com a ação da gravidade, essa perturbação se desenvolve até que o fluido de menor densidade tende a se elevar enquanto o fluido mais denso decai, como ilustra a Figura 27c.

Figura 27 – a) Perfil vertical ionosférico típico para a região equatorial. b) Analogia do perfil mostrado em a) com o caso de um fluido denso sendo suportado por um fluido de menor densidade. c) Ilustração da evolução da instabilidade hidrodinâmica R-T.

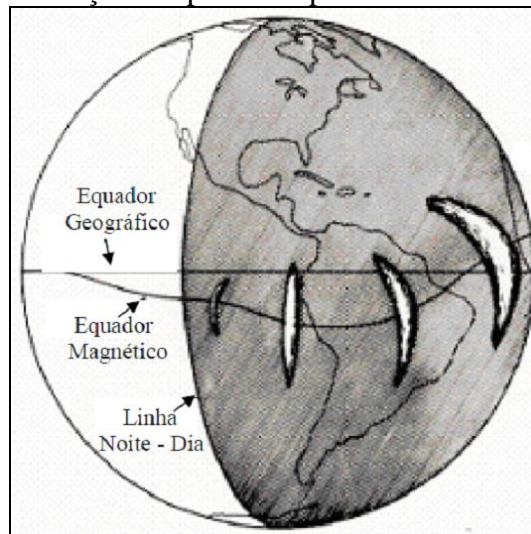


Fonte Adaptado de Kelley (1989) apud Rodrigues (2003).

Todavia, o processo de instabilidade R-T generalizada o qual se aplica à ionosfera não é tão simplório como esquematiza a Figura 27c. Diversos processos e efeitos influenciam na geração e evolução das irregularidades ionosféricas, como por exemplo, os processos eletrodinâmicos intrínsecos da ionosfera equatorial e de baixas latitudes e os efeitos de acoplamento ionosfera-magnetosfera em altas latitudes. Além disso, irregularidades de larga escala, quando evoluem através da região F, podem gerar irregularidades secundárias de vários tamanhos (RODRIGUES, 2003).

Dados de foguetes e de satélites obtidos durante eventos de ESF mostram acentuadas depleções de plasma, denominadas de bolhas ionosféricas. Radars de espalhamento coerente associam essas regiões de depleções com estruturas chamadas de plumas. As plumas apresentam uma rápida subida e a ocorrência de fortes ecos oriundos de irregularidades com escala de alguns metros no seu interior. A ESF detectada em ionogramas equatoriais representa irregularidades na porção inferior da camada F, que podem estar associadas ou não a bolhas ionosféricas que evoluem até a porção superior da ionosfera. Já a ESF observada em ionogramas de baixas latitudes é indicador de irregularidades contidas em bolhas ionosféricas (RODRIGUES, 2003). As bolhas podem atingir extensões de 10.000 km ao longo das linhas de campo magnético e cerca de 150 a 300 km (ou mais) na direção perpendicular (SANTOS, 2001). Ocorrem sempre após o pôr do Sol e, principalmente, até a meia-noite. A Figura 28 apresenta, artisticamente, a evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.

Figura 28 – Evolução temporal e espacial das bolhas ionosféricas.



Fonte: Soares (2001) apud Matsuoka (2007).

A avaliação e classificação do comportamento das irregularidades ionosféricas podem ser realizadas a partir do emprego de diversos índices ionosféricos (PEREIRA; CAMARGO, 2017), os quais podem ser obtidos com o uso de dados de ionossondas, tais como o índice AI (BREMER et al., 2006) e o índice AI modificado (MIELICH; BREMER, 2010), ou com dados de arquivos IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*): W_p e índice W (GULYAEVA et al., 2013; GULYAEVA; STANISLAWSKA, 2008), ou com dados GNSS: I_{ROT} (WANNINGER, 1993), ROTI (PI et al., 1997), f_p e F_p (MENDILLO et al., 2000) e DIX (JAKOWSKI et al., 2012).

O estudo e monitoramento das irregularidades ionosféricas por meio de índices têm sido realizados por vários pesquisadores em diversos centros de estudos, como pode ser verificado em Pereira e Camargo (2017), Pereira e Camargo (2016), Pereira e Camargo (2014), Pereira et al. (2014), Oladipo e Schüler (2013), Pereira e Camargo (2013), Matsuoka et al. (2013), Chu et al. (2008), Li et al. (2007), Shan et al. (2002), Mendillo et al. (2000), Pi et al. (1997), Wanninger (1995) e Wanninger (1993).

As estimativas dos índices de irregularidades f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI se baseiam na taxa de variação do TEC (ROT). O ROT é calculado por meio da razão da diferença entre os TEC obtidos consecutivamente entre duas épocas (t_1 e t_2) pelo intervalo de tempo decorrido entre as respectivas determinações (PEREIRA; CAMARGO, 2017):

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta TEC}{\Delta t} \quad (9)$$

onde o TEC pode ser obtido utilizando tanto as pseudodistâncias advindas dos códigos nas portadoras L1 e L2 (equação (7)) ou L1 e L5, quanto a partir da combinação entre as medidas de fase das portadoras L1 e L2 (equação (8)) ou L1 e L5.

Como a magnitude da precisão da fase é de ordem centimétrica a milimétrica, ao contrário da pseudodistância que é de ordem métrica (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008), utilizam-se as medidas de fase para o cálculo do ROT. Substituindo a equação (8) na equação (9) obtém-se uma estimativa do ROT tendo como parâmetros apenas as medidas de fase das portadoras L1 e L2 nas épocas t_1 e t_2 (PEREIRA; CAMARGO, 2017):

$$\text{ROT} = \frac{9,52 \cdot 10^{16} \left[\lambda_{L2} \left(\Phi_{rL2t_2}^s - \Phi_{rL2t_1}^s \right) - \lambda_{L1} \left(\Phi_{rL1t_2}^s - \Phi_{rL1t_1}^s \right) \right]}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

sendo o ROT da equação (10) utilizado apenas para os satélites GPS e, caso a estimativa utilize as portadoras L1 e L5, essa equação também é válida para os satélites Galileo, pois ambos os sistemas são CDMA.

Já para os satélites GLONASS, que são FDMA, deve-se utilizar (PEREIRA; CAMARGO, 2017):

$$\text{ROT} = \frac{\frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \left[\lambda_{L2} \left(\Phi_{rL2t_2}^s - \Phi_{rL2t_1}^s \right) - \lambda_{L1} \left(\Phi_{rL1t_2}^s - \Phi_{rL1t_1}^s \right) \right]}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

onde os valores das frequências das portadoras L1 e L2 de cada satélite são determinados a partir das equações (1) e (2), respectivamente, e os comprimentos de onda a partir da divisão da velocidade da luz no vácuo pelas frequências calculadas.

Wanninger (1995) salienta que, após a determinação do ROT utilizando a fase da portadora, alguns erros podem não ser minimizados ou eliminados totalmente, como o caso do multicaminho e os erros aleatórios. No entanto, ainda de acordo com o autor, a magnitude desses erros não ultrapassa 0,3 TECU/min para o multicaminho e 0,07 TECU/min para os erros aleatórios.

O índice f_p (*phase fluctuation*) consiste no valor da mediana do módulo dos ROT para um período de 15 minutos, sendo os ROT estimados a cada minuto. O índice,

sempre maior ou igual a zero, é calculado para cada satélite de uma determinada estação (MENDILLO et al., 2000):

$$f_p(n, hr, i) = \text{Mediana}|\text{ROT}| \quad (12)$$

onde:

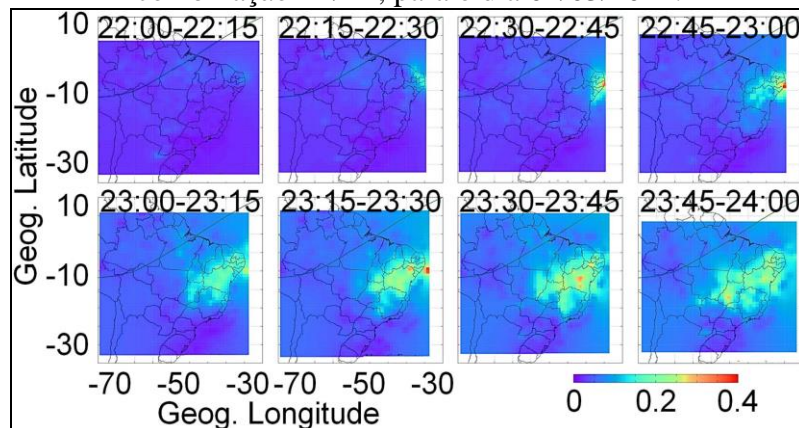
n – número do satélite;

hr – hora cheia, de 0h às 24h TU; e

i – número da seção, com duração de 15 minutos, contida em uma hora cheia, ou seja, $i = 1, 2, 3$ ou 4 .

Pelo fato do índice f_p ser mapeado para a posição do IPP de cada satélite rastreado, o mesmo é indicado para o estudo espacial das irregularidades ionosféricas (PEREIRA; CAMARGO, 2017). Como exemplo, a Figura 29 apresenta mapas de f_p sobre o Brasil para período das 22h às 24h TU do dia 1 de março de 2014, sendo a resolução temporal de 15 minutos para cada mapa.

Figura 29 – Mapas do índice f_p (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.



Fonte: Pereira e Camargo (2017).

O índice F_p , também proposto por Mendillo et al. (2000), é estimado para cada estação a cada hora cheia. Representa o valor médio dos índices f_p obtidos para todos os satélites rastreados em uma estação no período de uma hora, que por sua vez é obtido por meio da seguinte equação:

$$F_p(\text{hr}) = \frac{\sum_n^{\text{nsat}} \left[\frac{\sum_i^k f_p(n, \text{hr}, i)}{k} \right]}{\text{nsat}(\text{hr})} \cdot 1000 \quad (13)$$

onde:

nsat – número total de satélites observados durante o período de uma hora; e

k – número de valores de f_p disponíveis em cada hora ($k = 0, 1, 2, 3$ ou 4).

O índice supracitado é utilizado para fins gerais, isto é, quando se necessita de um valor que represente o nível geral de irregularidades ionosféricas (PEREIRA; CAMARGO, 2017).

Um valor $F_p \leq 50$ representa baixos níveis de irregularidades; $50 < F_p \leq 200$ significa a presença de irregularidades moderadas, e quando $F_p > 200$ representa a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas (MENDILLO et al., 2000).

Wanninger (1993) apresenta um índice para caracterizar flutuações de fase como diagnóstico de irregularidades ionosféricas, denominado de I_{ROT} . O índice, calculado para um período de 15 minutos, é baseado no RMS dos ROT:

$$I_{\text{ROT}} = 10 \cdot \text{RMS}(\text{ROT}) \quad (14)$$

Diferentemente de Mendillo et al. (2000), Wanninger (1993) não apresenta um padrão classificatório do I_{ROT} ; o autor apenas conclui que valores próximos ou superiores a três caracterizam fortes irregularidades ionosféricas. Assim, Pereira e Camargo (2014) realizaram um experimento visando determinar um padrão classificatório para o I_{ROT} , obtendo os seguintes limiares: $I_{\text{ROT}} \leq 0,5$ – baixos níveis de irregularidades; $0,5 < I_{\text{ROT}} \leq 2,0$ – irregularidades moderadas; e $I_{\text{ROT}} > 2,0$ – fortes níveis de irregularidades ionosféricas.

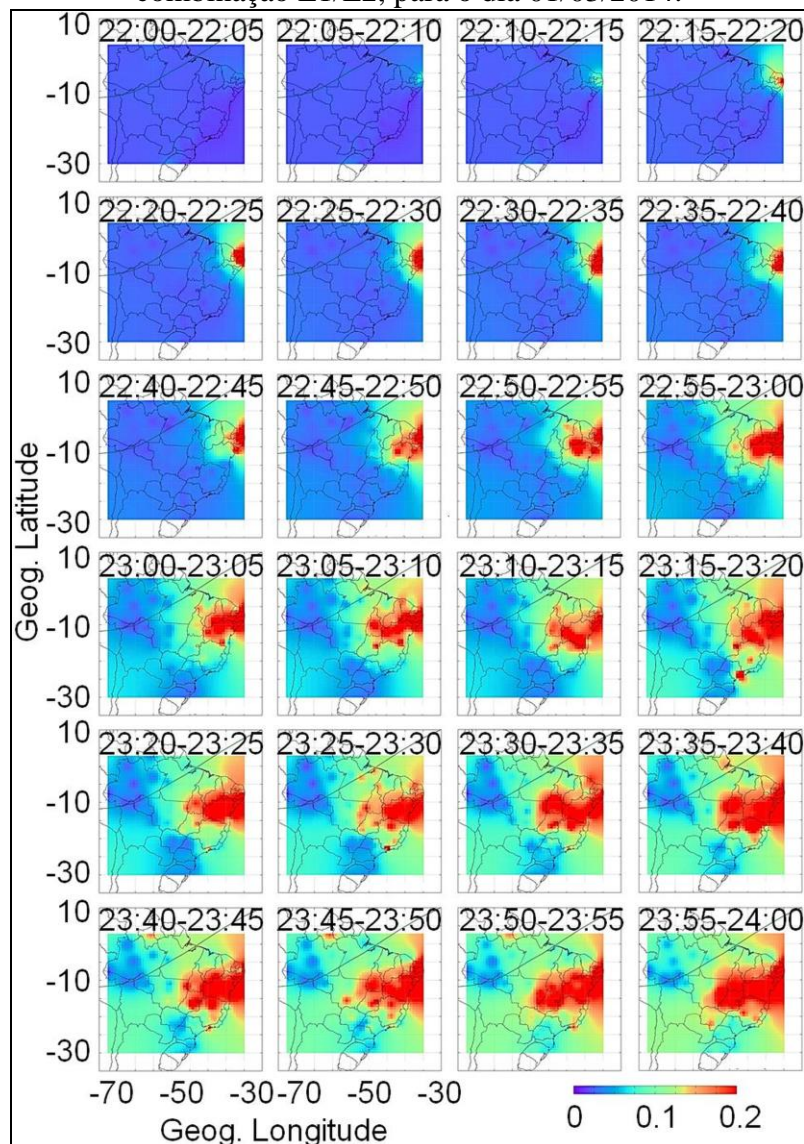
Devido ao fato de que as flutuações de fase em pequena escala não estavam sendo identificadas, Pi et al. (1997) sugerem que um índice para a taxa de variação do TEC poderia ser determinado com base no desvio-padrão do ROT em um intervalo de apenas cinco minutos. Denominado de ROTI, o índice é obtido por (PI et al., 1997):

$$\text{ROTI} = \sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle - \langle \text{ROT} \rangle^2} \quad (15)$$

onde $\langle \rangle$ representa a média.

Análoga à situação do índice I_{ROT} , um padrão classificatório para o índice ROTI teve que ser determinado: $ROTI \leq 0,05$ para baixos níveis de irregularidades; $0,05 < ROTI \leq 0,2$ para a presença de irregularidades moderadas, e $ROTI > 0,2$ para a ocorrência de fortes níveis de irregularidades ionosféricas (PEREIRA; CAMARGO, 2014). Exemplo de mapas de ROTI é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Mapas do índice ROTI (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.



Fonte: Pereira e Camargo (2017).

Devido ao intervalo de tempo para a determinação do ROTI ser apenas cinco minutos, Pereira e Camargo (2017) recomendam o seu uso para o estudo temporal das irregularidades ionosféricas.

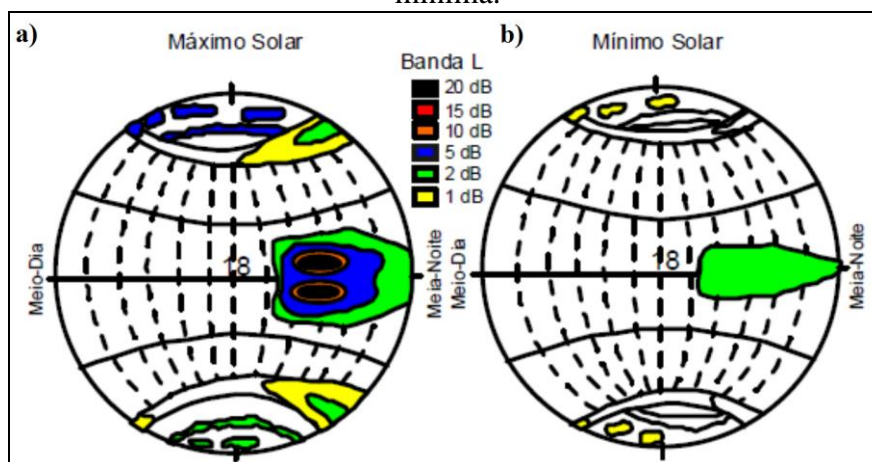
No Brasil, usuários e pesquisadores que desejam estimar índices de irregularidades da ionosfera, bem como de cintilação dos sinais GNSS, em tempo real e pós-processado podem utilizar o programa científico Ion_Index (PEREIRA; CAMARGO, 2016; PEREIRA; CAMARGO, 2017), disponível em <<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/software/>>. O Ion_Index utiliza a infraestrutura já existente de dados de receptores GNSS de redes ativas públicas, como a RBMC, a GNSS-SP e a CIGALA/CALIBRA, proporcionando assim um aumento na resolução espacial das informações sobre o comportamento da ionosfera na região brasileira. Mais informações sobre o Ion_Index e possíveis aplicações, consultar Pereira e Camargo (2016) e Pereira e Camargo (2017).

3.6 Cintilação dos Sinais GNSS e Índices

Cintilação dos sinais GNSS ou cintilação ionosférica (do inglês *ionospheric scintillation*) são flutuações da amplitude e/ou fase de uma onda eletromagnética, resultado da sua propagação através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons e , conseqüentemente, do índice de refração (RODRIGES, 2003). A cintilação pode provocar um enfraquecimento no sinal captado pelos receptores GNSS, fazendo com que ocorra em muitos casos a perda de sintonia do sinal (WEBSTER, 1993).

De acordo com Aarons (1982) e Basu et al. (1988) apud Rodrigues (2003), há três regiões geográficas principais de ocorrências de cintilações, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Morfologia global das cintilações durante anos de atividade solar a) máxima e b) mínima.



Fonte: Adaptado de Basu et al. (1988) apud Rodrigues (2003).

A primeira é a região equatorial ou de baixas latitudes, após o pôr do Sol. A segunda a região compreende o lado noturno da oval da aurora e o lado diurno do vértice polar. Por fim, a última é a região mais interna da calota polar, onde é possível observar cintilações a qualquer momento (RODRIGUES, 2003). Nas regiões de médias latitudes, os efeitos da cintilação são normalmente negligenciáveis.

Na região equatorial e de baixas latitudes, a maior intensidade das cintilações está associada às regiões de pico (norte e sul) da AIE, localizadas aproximadamente nas latitudes geomagnéticas 15°N e 15°S . A geração das irregularidades equatoriais e a ocorrência de um máximo secundário de ionização durante o período após o ocaso solar se combinam de forma a resultar no máximo de atividade de cintilação nessa região (RODRIGUES, 2003).

As cintilações em altas latitudes são mais fracas que as cintilações observadas na AIE. Na região equatorial e de baixas latitudes, as cintilações são causadas por irregularidades do plasma ionosférico, e nas regiões de altas latitudes a ocorrência da cintilação é devida, principalmente, às tempestades geomagnéticas (SKONE, 1998).

As cintilações que os sinais GNSS sofrem devido às irregularidades na ionosfera podem ser quantificadas, por exemplo, pelos índices σ_{Φ} (VAN DIERENDONCK et al., 1993), S4 (CONKER et al., 2003), S_{Φ} (FORTE, 2007) e σ_{CHAIN} (MUSHINI et al., 2012).

As cintilações de amplitude são determinadas pelo índice S4, que consiste no desvio-padrão normalizado das observações da intensidade do sinal livres de tendências, as quais são amostradas em altas taxas em um intervalo de 60 segundos (CONKER et al., 2003; VAN DIERENDONCK et al., 1993). As tendências referem-se aos efeitos que o sinal sofre durante o percurso do satélite ao receptor que não são classificados como cintilação, como por exemplo, os efeitos dinâmicos receptor-satélite, erros do relógio do receptor e do satélite, efeitos de multicaminho, ruídos do receptor, vibrações de plataforma, dentre outros (NIU, 2012).

O índice S4 é adimensional, estimado tanto para os sinais provenientes das portadoras L1 e L2 quanto para a portadora L5. Vários padrões de classificação do nível de cintilação de amplitude são encontrados na literatura; Conker et al. (2003), por exemplo, definem para a portadora L1:

- Ausência de cintilação: $S4 \approx 0,0$; e
- Cintilação forte: $S4 \approx 1,0$.

Muella et al. (2009), no entanto, classificam os níveis de cintilação ionosférica, também para a portadora L1, em :

- Cintilação fraca: $0,2 < S4 \leq 0,4$;
- Cintilação moderada: $0,4 < S4 \leq 0,6$;
- Cintilação forte: $0,6 < S4 \leq 1,0$; e
- Cintilação saturada: $1,0 < S4 \leq 1,4$.

Receptores GNSS apropriados ao monitoramento da ionosfera (por exemplo, NovAtel GPStation-6, Septentrio PolaRxS-PRO e GSV 4004B) podem disponibilizar valores de S4 superiores aos limites teóricos. O efeito do multicaminho, em alguns casos, pode elevar o índice S4, proporcionando assim uma falsa ocorrência de cintilação ionosférica (BRASSAROTE et al., 2018). Isso acontece principalmente no início e/ou término do rastreamento de um satélite, quando o ângulo de elevação é da ordem de poucos graus. Portanto, em estações monitoras de cintilação é necessário que o nível de multicaminho seja conhecido e controlado.

Os passos para a determinação do índice S4 podem ser obtidos em Niu (2012). Primeiramente, a variância da intensidade do sinal é normalizada pelo quadrado da média da intensidade do sinal em um minuto, obtendo-se assim o índice S4T:

$$S4T = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} \quad (16)$$

onde:

S4T – índice “S4 total”, o qual contém as flutuações de amplitude de qualquer causa, isto é, abrange os ruídos do ambiente; e

I – intensidade do sinal amostrada, geralmente, a uma taxa de 50 Hz.

Caso não sejam removidos os ruídos do ambiente, o S4T apresenta um acréscimo nos valores se comparado com o índice após a remoção, acarretando assim em uma estimativa errônea. Dessa forma, a parcela de S4 proveniente de ruídos do ambiente, representada por $S4N_0$, é dada por (VAN DIERENDONCK et al., 1993):

$$S4N_0 = \sqrt{\frac{100}{S/N_0} \cdot \left[1 + \frac{500}{19 \cdot S/N_0} \right]} \quad (17)$$

onde S/N_0 consiste na densidade média da razão sinal-ruído no intervalo de um minuto.

Por fim, o índice S4 é obtido a partir da raiz quadrada da diferença dos quadrados de S4T e S4N₀ (VAN DIERENDONCK et al., 1993):

$$S4 = \sqrt{S4T^2 - S4N_0^2} = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} - \frac{100}{S/N_0} \cdot \left[1 + \frac{500}{19 \cdot S/N_0} \right]} \quad (18)$$

As cintilações de fase são quantificadas pelo índice σ_Φ , que consiste no desvio-padrão das observações da fase do sinal livres de tendências (Φ_ϵ), as quais são coletadas a altas taxas (geralmente 50 Hz) em um intervalo de 60 segundos, sendo comumente conhecido como Φ_{60} . O σ_Φ também pode ser calculado ao longo de 1, 3, 10 e 30 segundos de intervalo, sendo que, nesses casos, uma normalização deve ser realizada sobre a média em 60 segundos (VAN DIERENDONCK et al., 1993). A equação (19) apresenta o cálculo do índice:

$$\sigma_\Phi = \sqrt{\langle \Phi_\epsilon^2 \rangle - \langle \Phi_\epsilon \rangle^2} \quad (19)$$

Ao contrário do índice S4 (adimensional), o índice σ_Φ é medido em radianos, podendo ser expresso também em graus e metros.

De acordo com Skone et al. (2005), para a portadora L1, as cintilações de fase são classificadas em:

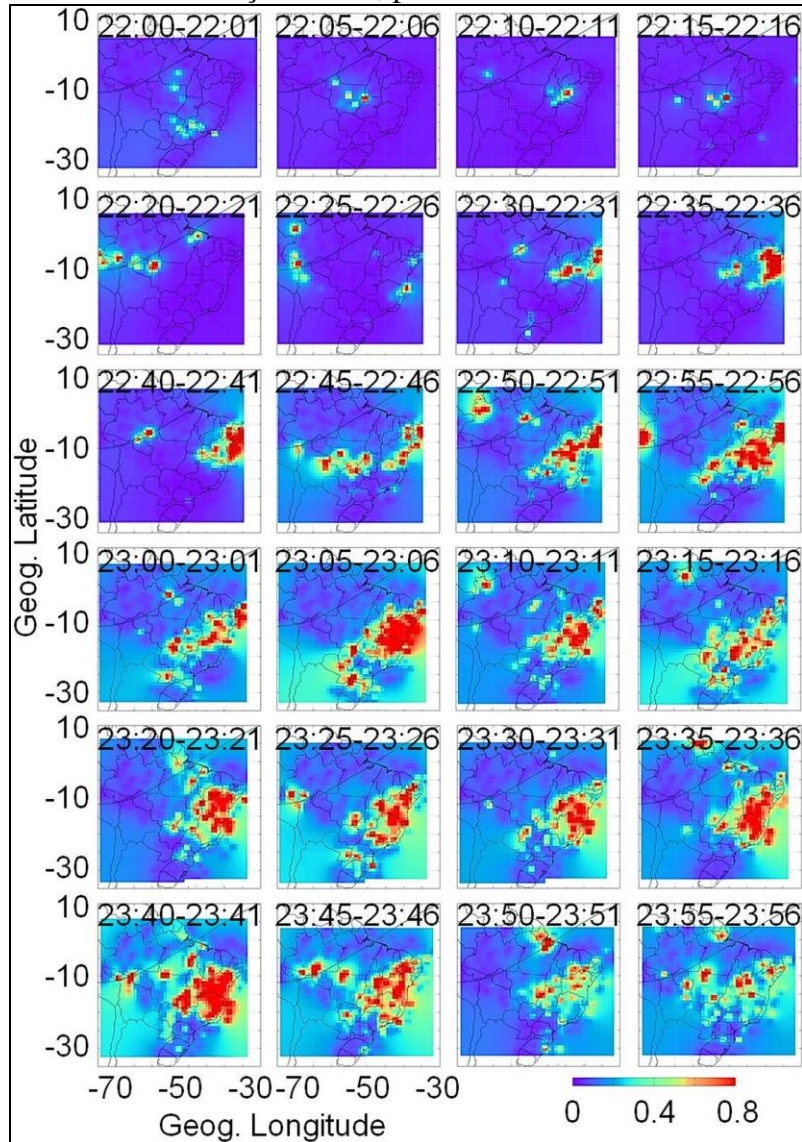
- Cintilação fraca: $\sigma_\Phi \approx 0,05$ rad; e
- Cintilação forte: $\sigma_\Phi \approx 1,0$ rad.

Hegarty et al. (2001), por sua vez, apresentam o seguinte padrão classificatório:

- Cintilação muito fraca: $0,05 \text{ rad} < \sigma_\Phi \leq 0,2 \text{ rad}$;
- Cintilação fraca: $0,2 \text{ rad} < \sigma_\Phi \leq 0,3 \text{ rad}$;
- Cintilação moderada: $0,3 \text{ rad} < \sigma_\Phi \leq 0,6 \text{ rad}$; e
- Cintilação forte: $\sigma_\Phi > 0,6 \text{ rad}$.

Exemplo de monitoramento de cintilações ionosféricas de fase no Brasil por meio do índice σ_ϕ é apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Mapas do índice σ_ϕ (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.



Fonte: Pereira e Camargo (2017).

Já o índice de cintilação de fase S_ϕ , proposto por Forte (2007), é uma alternativa para as incertezas que existem sob o índice σ_ϕ , apresentadas por Beach (2006) apud Niu (2012). O índice, dado em rad/s, é calculado pela expressão:

$$S_\phi = \sqrt{\left\langle \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial t} \right)^2 \right\rangle} \quad (20)$$

Diferentemente do índice σ_ϕ , o S_ϕ leva em consideração a taxa de variação das flutuações de fase da portadora, mostrando, de acordo com Forte (2007), mais consistência quando se utilizam diferentes métodos de *detrending* nas observações, sendo considerado dessa forma um dos indicadores mais robusto para o monitoramento das cintilações de fase.

Por fim, o índice de cintilação de fase CHAIN, introduzido por Mushini et al. (2012) e representado por σ_{CHAIN} , é o resultado de uma modificação no índice S_ϕ . A equação (21) apresenta a estimativa do índice:

$$\sigma_{\text{CHAIN}} = \sqrt{\left\langle \left(\frac{\partial \Phi_e}{\partial t} \right)^2 \cdot |\Phi_e| \right\rangle} \quad (21)$$

O índice σ_{CHAIN} utiliza, além da taxa de variação das flutuações de fase, a amplitude das flutuações. É considerado um dos melhores índices de cintilação de fase para medidas realizadas em regiões de altas latitudes se comparado com o σ_ϕ , uma vez que proporciona grande correlação com o índice S4 (MUSHINI et al., 2012; NIU, 2012).

Análises de cintilações ionosféricas por meio de índices podem ser encontradas em vários artigos, como por exemplo: Pereira e Camargo (2017), Pereira e Camargo (2016), Chatterjee e Chakraborty (2013), Béniguel et al. (2009), Kintner et al. (2007), Li et al. (2007) e Skone et al. (2005).

4 MODELO DE RISCO IONOSFÉRICO

Um dos princípios básicos de funcionamento do GBAS é que as estações de referência em solo e o receptor da aeronave rastreiem simultaneamente um número mínimo de satélites.

Uma vez que os sinais dos satélites são submetidos a atrasos devidos à camada ionosférica (no que se refere à pseudodistância, ou avanço com respeito à fase da portadora), tem-se que tais atrasos não são iguais, já que as linhas de visadas são diferentes para os receptores das estações e da aeronave. Nesse cenário é que se aplica um modelo de risco ionosférico.

Num modelo de risco ionosférico, determina-se a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso proporcionado pelo sinal de um satélite na direção de uma estação de referência e o atraso que esse mesmo sinal impõe à medida realizada por um receptor numa aeronave. Para tal determinação, deve-se considerar uma distância limite máxima entre a aeronave e a estação de referência, de modo a representar a pior situação possível. O modelo de risco deve também fornecer parâmetros de integridade, de modo a permitir a estimativa da qualidade do posicionamento da aeronave durante as fases de aproximação e pouso (DATTA-BARUA et al., 2010). A análise é então realizada a partir da razão entre a diferença entre os atrasos devidos à ionosfera e uma distância característica de separação entre as linhas de visadas, razão essa denominada de gradiente ionosférico (DATTA-BARUA et al., 2010; DATTA-BARUA et al., 2002).

Para o desenvolvimento e avaliação de um modelo de risco, utilizam-se dados GPS de vários anos, contemplando diferentes cenários de atividades solares e ionosféricas (DATTA-BARUA et al., 2010). Destaca-se que o modelo de risco ionosférico é único e exclusivo para a região dos dados GPS utilizados em seu desenvolvimento. Assim, para cada estação GBAS instalada em um determinado aeroporto, é necessário que se desenvolva ou avalie o seu próprio modelo de risco.

Na sequência, são apresentadas as equações para a determinação dos níveis de proteção VPL e HPL da aeronave, sendo um dos parâmetros existentes nessas equações o desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical (σ_{vig}), determinado pelo modelo de risco ionosférico e transmitido na mensagem GBAS Tipo 2 (ICAO, 2013c). São também apresentados os parâmetros que compõem o modelo CONUS de risco ionosférico, os métodos para a determinação dos mesmos, o procedimento geral para a avaliação do modelo, o cálculo

do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical e, por fim, exemplos de modelos de risco já desenvolvidos/avaliados por alguns países e instituições.

4.1 Cálculo dos Níveis de Proteção da Aeronave

A aeronave deve ser capaz de estimar em tempo real os níveis de proteção (PL), que são determinados de modo a atender ao seguinte requisito (LEE, 2005):

$$\text{Prob}(\text{erro posicional verdadeiro} > \text{PL}) \leq \alpha \quad (22)$$

onde os níveis de proteção devem sobrepor o erro posicional verdadeiro, que é desconhecido em tempo real, com uma probabilidade de $(1 - \alpha)$ (probabilidade essa correspondente aos valores de integridade da Tabela 4, para cada tipo de operação de voo).

Os níveis de proteção horizontal (HPL) e vertical (VPL) são obtidos a partir das mensagens GBAS e dos parâmetros de integridade do modelo de risco, os quais são transmitidos via *link* VHF, como apresentado a seguir.

Primeiramente, reescrevendo a equação da pseudodistância de um determinado satélite (s) registrada por um receptor (r), conforme apresentado na equação (3), em termos das coordenadas geodésicas cartesianas do satélite e do receptor, obtém-se:

$$\text{PD}_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \text{Orb}^s + v_{\text{PD}_r^s} \quad (23)$$

onde:

x^s, y^s, z^s – coordenadas geodésicas cartesianas do satélite determinadas a partir das efemérides precisas ou transmitidas; e

x_r, y_r, z_r – coordenadas geodésicas cartesianas do receptor a serem determinadas.

Substituindo o termo dos erros dos relógios $c(dt_r - dt^s)$ da equação (23) por dt , e os erros devido à ionosfera (I_r^s), troposfera (T_r^s), multicaminho (dm_r^s), posição do satélite (Orb^s) e erros sistemáticos não modelados e aleatórios ($v_{\text{PD}_r^s}$) por apenas $\tilde{\epsilon}$, têm-se (LEE, 2005):

$$PD_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} + dt + \tilde{\varepsilon} \quad (24)$$

Como são rastreados N satélites pelo receptor da aeronave, haverá assim N equações de pseudodistâncias registradas ($s = 1, 2, \dots, N$). Para obter as correções diferenciais na pseudodistância devem-se calcular as respectivas distâncias geométricas entre o receptor e os N satélites, a partir do uso das coordenadas geodésicas aproximadas (x_{r0}, y_{r0}, z_{r0}) e dos erros aproximados dos relógios do receptor e dos satélites (dt_0) (LEE, 2005):

$$\rho_{r0}^s = \sqrt{(x^s - x_{r0})^2 + (y^s - y_{r0})^2 + (z^s - z_{r0})^2} + dt_0 \quad (25)$$

Assim, realizando a diferença entre as pseudodistâncias observadas (PD_r^s) e as distâncias geométricas calculadas (ρ_{r0}^s) obtêm-se as correções diferenciais (Δp_r^s), cujo modelo funcional matricial, após manipulações matemáticas, é dado por (LEE, 2005):

$$\Delta p_r^s = PD_r^s - \rho_{r0}^s = A \begin{bmatrix} x_r - x_{r0} \\ y_r - y_{r0} \\ z_r - z_{r0} \\ dt - dt_0 \end{bmatrix} + \tilde{\varepsilon} = A \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \\ \Delta dt \end{bmatrix} + \tilde{\varepsilon} \quad (26)$$

sendo:

Δp_r^s – vetor N x 1 contendo as correções diferenciais de pseudodistância para cada satélite; e

A – matriz *design* (jacobiana) receptor-satélite, constituída por N linhas e quatro colunas.

Uma forma de se obter os elementos da matriz A é apresentada por Srinivas et al. (2014), em função do azimute (Az) e da elevação (E) de cada satélite em um sistema de coordenadas geodésico local, com origem no receptor da aeronave. A matriz da equação (27) apresenta tais elementos.

$$A = \begin{bmatrix} \cos E^{(1)} \cos Az^{(1)} & \cos E^{(1)} \sin Az^{(1)} & \sin E^{(1)} & 1 \\ \cos E^{(2)} \cos Az^{(2)} & \cos E^{(2)} \sin Az^{(2)} & \sin E^{(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos E^{(N)} \cos Az^{(N)} & \cos E^{(N)} \sin Az^{(N)} & \sin E^{(N)} & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Dessa forma, considerando como incógnita o vetor que contém as coordenadas cartesianas do receptor da aeronave e os erros dos relógios, a solução é obtida aplicando o ajustamento de observações pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), dada pela equação (28):

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_r \\ \Delta \hat{y}_r \\ \Delta \hat{z}_r \\ \Delta \hat{dt} \end{bmatrix} = (A^T P A)^{-1} A^T P \Delta p_r^s \quad (28)$$

sendo P a matriz peso diagonal, de ordem N, das medidas de pseudodistância, uma vez que se assume que os erros de medidas não são correlacionados e que possuem distribuição gaussiana (LEE, 2005). A matriz P é determinada por:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{PD}^2 (1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{PD}^2 (2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{PD}^2 (N)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Para cada medida de pseudodistância de cada satélite (s), assume-se o seguinte modelo de erro (SRINIVAS et al., 2014; LEE, 2005):

$$\sigma_{PD}^2 (s) = \sigma_{aeronave}^2 (s) + \sigma_{troposfera}^2 (s) + \sigma_{ionosfera}^2 (s) + \sigma_{estação}^2 (s) \quad (30)$$

onde o erro devido à aeronave (σ_{aeronave}) é determinado a partir do ruído do receptor e de um modelo específico de multicaminho, os erros devido à troposfera ($\sigma_{\text{troposfera}}$) e à ionosfera ($\sigma_{\text{ionosfera}}$) estimados a partir de erros residuais, e o erro devido à estação ($\sigma_{\text{estação}}$) calculado por meio de um modelo de multicaminho e de ruídos do receptor da estação de referência. As subseções 4.1.1 a 4.1.4 apresentam mais detalhes de cada um dos erros que compõe o modelo de erro da pseudodistância, sendo as equações dos erros as mesmas utilizadas pelo LAAS.

Para fins de simplificação, determina-se a matriz de projeção S ($4 \times N$) por (LEE, 2005):

$$S = (A^T P A)^{-1} A^T P \quad (31)$$

Assim, definidos todos os vetores e matrizes do ajustamento, obtêm-se os desvios-padrão dos erros de posição horizontal e vertical a partir das equações (32) e (33) (SRINIVAS et al., 2014; LEE, 2005):

$$\sigma_{\text{Erro Posição Horizontal}} = \sqrt{\sum_{s=1}^N S_{\text{horizontal}}^2(s) \cdot \sigma_{\text{PD}}^2(s)} \quad (32)$$

$$\sigma_{\text{Erro Posição Vertical}} = \sqrt{\sum_{s=1}^N S_{\text{vertical}}^2(s) \cdot \sigma_{\text{PD}}^2(s)} \quad (33)$$

sendo $S_{\text{horizontal}}^{(s)}$ e $S_{\text{vertical}}^{(s)}$ as componentes horizontal e vertical da matriz S para um satélite (s), respectivamente. Para as determinações de $S_{\text{horizontal}}^{(s)}$ e $S_{\text{vertical}}^{(s)}$, por exemplo, realizam-se as seguintes operações (ROWSON et al., 1998):

$$S_{\text{horizontal}}^{(s)} = \sqrt{S_1^{2(s)} + S_2^{2(s)}} \quad (34)$$

$$S_{\text{vertical}}^{(s)} = S_3^{(s)} + S_1^{(s)} \cdot \tan \theta_{\text{GPA}} \quad (35)$$

onde $S_1^{(s)}$, $S_2^{(s)}$ e $S_3^{(s)}$ correspondem aos s -ésimos elementos da primeira, segunda e terceira linha de S , respectivamente, e θ_{GPA} (*glide path angle*) o ângulo de deslocamento para o caminho de aproximação final, normalmente adotado o valor de 3° (SRINIVAS et al., 2014).

Supondo que os erros de posição horizontal e vertical possuem distribuição gaussiana, os níveis de proteção horizontal e vertical podem então ser calculados pelas

equações (36) e (37), considerando a hipótese H0 (sem falhas) (SRINIVAS et al., 2014; LEE, 2005; WALTER et al., 1997):

$$\text{HPL} = K_{\text{ffmd}} \cdot \sigma_{\text{Erro Posição Horizontal}} \quad (36)$$

$$\text{VPL} = K_{\text{ffmd}} \cdot \sigma_{\text{Erro Posição Vertical}} \quad (37)$$

onde K_{ffmd} (*fault-free missed detection*) é o quantil de uma distribuição gaussiana unitária correspondente a α (LEE, 2005). Rowson et al. (1998) ressaltam também que K_{ffmd} é um multiplicador que representa a probabilidade de detecção de erros na pseudodistância sem falhas, sendo o seu valor dependente do número de estações de referência em operação no GBAS e do tipo de operação de voo. A Tabela 9 apresenta os valores de K_{ffmd} para as aproximações precisas CAT-I, II e III.

Tabela 9 – Valores de K_{ffmd} para as aproximações precisas CAT-I, II e III.

Operação de Voo	Número de Estações de Referência em Operação no GBAS		
	2	3	4
CAT-I	5,762	5,810	5,847
CAT-II	6,598	6,641	6,673
CAT-III	6,598	6,641	6,673

Fonte: Rowson et al. (1998).

4.1.1 Erro devido à aeronave

O erro devido à aeronave é composto por duas partes: o erro de ruído do receptor ($\sigma_{\text{ruído}}$) e o erro de multicaminho ($\sigma_{\text{multicaminho}}$) (LEE, 2005). O erro de ruído do receptor ocorre por causa do ruído de banda larga e de interferências provenientes de ruídos térmicos, tendências inter-frequências e erros de processamento no receptor da aeronave, sendo modelado por:

$$\sigma_{\text{ruído}}^{(s)} = a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{E^{(s)}}{E_c}} \quad (38)$$

onde:

$E^{(s)}$ – ângulo de elevação do satélite (s), variando de 5° a 90°; e

a_0 , a_1 e E_c – designadores de acurácia da aeronave (AAD – *Airborne Accuracy Designator*), os quais são definidos com o intuito de refletir os níveis de performance dos receptores.

A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros a_0 , a_1 e E_c em função dos designadores de acurácia da estação de referência (GAD – *Ground Accuracy Designator*):

Tabela 10 – Valores dos parâmetros a_0 , a_1 e E_c em função dos designadores de acurácia da estação de referência.

AAD	a_0	a_1	E_c
GAD-A	0,15 m	0,43 m	6,9°
GAD-B	0,11 m	0,13 m	4,0°

Fonte: Lee (2005).

Já o $\sigma_{\text{multicaminho}}$ é o erro devido à fuselagem da aeronave, sendo descrito por uma distribuição normal $N(0, \sigma_{\text{multicaminho}}^2)$, onde:

$$\sigma_{\text{multicaminho}}^{(s)} = 0,13 + 0,53 \cdot e^{-\frac{E^{(s)}}{10^p}} \quad (39)$$

Por fim, o erro devido à aeronave para um determinado satélite é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros de ruído e de multicaminho (LEE, 2005):

$$\sigma_{\text{aeronave}}^{(s)} = \sqrt{\sigma_{\text{ruído}}^2{}^{(s)} + \sigma_{\text{multicaminho}}^2{}^{(s)}} \quad (40)$$

Considerando os parâmetros GAD-A, tem-se que o erro devido ao ruído do receptor varia de 0,15 m (elevação de 90°) a 0,36 m (5°), e o erro de multicaminho de 0,13 m (90°) a 0,45 m (5°), proporcionando um σ_{aeronave} mínimo de 0,20 m e máximo de 0,58 m. A partir desses valores, verifica-se que, embora sejam evitadas as medidas dos satélites com baixo ângulo de elevação, o erro resultante da aeronave é da ordem de dezenas de centímetros. Com o aprimoramento no desenvolvimento de receptores e modelos de antenas para a navegação aérea, é esperado que os erros de ruído e de multicaminho sejam cada vez menores e controlados. Entretanto, a contribuição do erro da aeronave no cálculo de $\sigma_{\text{PD}}^2{}^{(s)}$ é aproximadamente de 5 a 10%, uma vez que o erro devido à ionosfera é de magnitude métrica.

4.1.2 Erro devido à troposfera

O sistema da aeronave precisa estimar o erro diferencial devido ao atraso troposférico, pois a aeronave desloca-se em alturas diferentes da altura das estações de referência em solo. A correção diferencial do atraso troposférico (TC – *Differential Tropospheric Delay Correction*) é determinada por (RTCA, 2001 apud LEE, 2005):

$$TC^{(s)} = N_R h_0 \cdot \frac{10^{-6}}{\sqrt{0,002 + \text{sen}^2 E^{(s)}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta h}{h_0}} \right) \quad (41)$$

onde:

N_R – índice de refratividade, adimensional, transmitido pela mensagem GBAS Tipo 2;

h_0 – altura da camada troposférica, em metros, transmitida pela mensagem GBAS Tipo 2; e

Δh – altura da aeronave, em metros, em relação às estações de referência do sistema GBAS.

Já o desvio-padrão da correção diferencial do atraso troposférico é dado por (RTCA, 2001 apud LEE, 2005):

$$\sigma_{\text{troposfera}}^{(s)} = \sigma_N h_0 \cdot \frac{10^{-6}}{\sqrt{0,002 + \text{sen}^2 E^{(s)}}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta h}{h_0}} \right) \quad (42)$$

sendo σ_N a incerteza do índice de refratividade (adimensional), também transmitida pela mensagem GBAS Tipo 2.

O GBAS é responsável por fornecer os parâmetros N_R , σ_N , h_0 e Δh , os quais devem ser consistentes com as condições troposféricas existentes nas estações de referência (LEE, 2005).

4.1.3 Erro devido à ionosfera

As decorrelações espaciais e temporais da ionosfera podem proporcionar erros diferenciais nas pseudodistâncias dos usuários de um GBAS. A incerteza do erro residual ionosférico é definida como (RTCA, 2001 apud LEE, 2005):

$$\sigma_{\text{ionosfera}}^{(s)} = F_{\text{pp}}^{(s)} \cdot \sigma_{\text{vig}} \cdot (X_{\text{aeronave}} + 2 \cdot \tau \cdot V_{\text{aeronave}}) \quad (43)$$

onde:

- $F_{\text{pp}}^{(s)}$ – fator de conversão adimensional de vertical para inclinado para um satélite (s), também denominado de fator de obliquidade, sendo determinado a partir da equação (44). O fator de obliquidade varia de 1 (ângulo de elevação igual a 90°) a pouco mais do que 3 (ângulo de elevação igual a 5°);
- σ_{vig} – desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical, necessário estar em m/m para o uso na equação;
- X_{aeronave} – distância inclinada entre a aeronave e a estação GBAS, em metros;
- τ – tempo constante do filtro de suavização (geralmente 100 segundos); e
- V_{aeronave} – velocidade horizontal da aeronave, em m/s.

$$F_{\text{pp}}^{(s)} = \left[1 - \left(\frac{R_m \cos E^{(s)}}{R_m + h_m} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (44)$$

sendo:

R_m – raio médio da Terra (6.371 km); e

h_m – altura média da camada ionosférica (geralmente 350 km).

O σ_{vig} é um dos parâmetros determinados por um modelo de risco ionosférico, sendo transmitido pela mensagem GBAS Tipo 2 para as aeronaves. Mais detalhes na seção 4.5.

4.1.4 Erro devido à estação

Análogo ao erro da aeronave, o erro devido à estação ocorre por causa de ruídos do receptor da estação de referência, de ruídos térmicos, de interferências locais, erros de processamento, bem como do multicaminho dos sinais GPS (LEE, 2005). O cálculo do desvio-padrão é dado pela equação (45), sendo o mesmo transmitido aos usuários na mensagem GBAS Tipo 1 :

$$\sigma_{\text{estação}}^{(s)} = \sqrt{\frac{\left(a_0 + a_1 \cdot e^{-\frac{E^{(s)}}{E_0}}\right)^2}{M} + a_2^2} \quad (45)$$

onde:

M – número de estações de referência operantes no GBAS; e
 a_0, a_1, a_2 e E_0 – designadores de acurácia da estação de referência (GAD).

Os valores dos parâmetros a_0, a_1, a_2 e E_0 para os GAD-A, GAD-B e GAD-C são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores dos parâmetros a_0, a_1, a_2 e E_0 para os GAD-A, GAD-B e GAD-C.

GAD		a_0	a_1	a_2	E_0
A		0,50 m	1,65 m	0,08 m	14,3°
B		0,16 m	1,07 m	0,08 m	15,5°
C	$E^{(s)} \geq 35^\circ$	0,15 m	0,84 m	0,04 m	15,5°
	$E^{(s)} < 35^\circ$	0,24 m	0,00 m	0,04 m	-

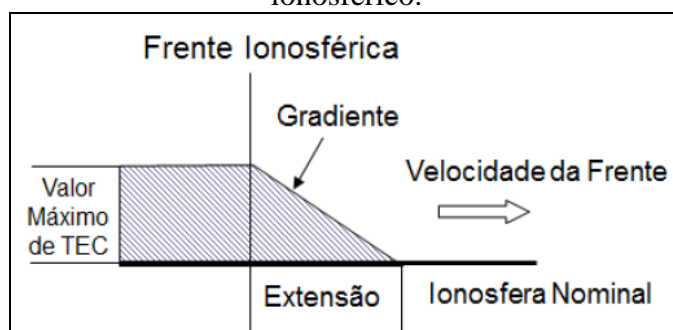
Fonte: Lee (2005).

4.2 Parâmetros do Modelo CONUS de Risco Ionosférico

No modelo CONUS de risco ionosférico, as irregularidades ionosféricas provenientes de tempestades geomagnéticas são modeladas como uma “frente de onda” ou “frente ionosférica”, que se deslocam com uma determinada velocidade horizontal de modo a produzir gradientes de erro ionosférico (MAYER et al., 2009). A representação de uma frente ionosférica é apresentada na Figura 33, sendo os parâmetros do modelo dado por:

- Gradiente ionosférico (g);
- Velocidade da frente ionosférica (V_{iono});
- Extensão da frente ionosférica (W_{iono}); e
- Valor máximo de atraso ionosférico (ou valor máximo de TEC).

Figura 33 – Representação de uma frente ionosférica e os parâmetros do modelo de risco ionosférico.



Fonte: Adaptado de Luo et al. (2005).

Os limites desses parâmetros são determinados por meio do processamento de um conjunto de dados que contemplam dias em que há fortes perturbações na densidade de elétrons da camada ionosférica. Os resultados obtidos são apresentados em função do ângulo de elevação dos satélites para o caso dos gradientes ionosféricos, em termos de valor máximo e de valor mínimo para a extensão e velocidade e, conforme já relatado, o próprio valor máximo de atraso ionosférico, não havendo variação temporal para os valores obtidos, isto é, os mesmos são válidos independentemente da época do ano.

As frentes ionosféricas podem ser classificadas como em movimento ou estacionárias. Durante uma aproximação precisa, a velocidade da aeronave em relação à da frente ionosférica determinará se a frente está se movendo de forma lenta ou rápida (SRINIVAS et al., 2014). A vantagem de uma frente se mover rapidamente é que as irregularidades ionosféricas podem ser detectadas com mais facilidade. A Tabela 12 apresenta os limites típicos dos parâmetros.

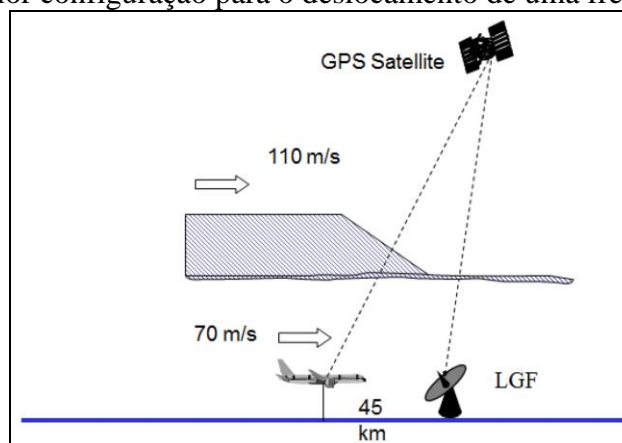
Tabela 12 – Variação típica dos parâmetros de um modelo de risco ionosférico.

Parâmetro	Variação Típica
Gradiente ionosférico	4 – 450 mm/km
Velocidade da frente ionosférica	0 – 750 m/s
Extensão da frente ionosférica	3 – 250 km

Fonte: Lee et al. (2011b).

Luo et al. (2003) estudaram diferentes cenários em termos de configuração espacial e avaliaram o caso de uma tempestade geomagnética ocorrida em 2000. Concluíram que a pior configuração para o deslocamento da frente ionosférica se dá quando ela se aproxima por trás e com velocidade superior à da aeronave, antes de ser detectada pelos receptores das estações de referência do GBAS (Figura 34).

Figura 34 – Pior configuração para o deslocamento de uma frente ionosférica.



Fonte: Adaptado de Luo et al. (2003).

Num modelo de risco, objetiva-se determinar os máximos gradientes ionosféricos existentes entre uma estação de referência e uma aeronave, com o intuito de representar o pior cenário em termos de erros ionosféricos. A metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo de risco ionosférico, apresentada na sequência, pode ser encontrada em Pereira et al. (2017), Srinivas et al. (2014), Bumrungrit et al. (2014), Mayer et al. (2009) e Ene et al. (2005), por exemplo.

Para verificar se os limites dos parâmetros do modelo de risco podem ser utilizados numa região, uma das possibilidades existentes consiste no uso de uma densa rede de estações de monitoramento contínuo dos sinais GPS. De fato, entre as alternativas de desenvolvimento do modelo, tem-se a que utiliza pares de estações (*station-pair method*), onde uma estação do par simula um GBAS e a outra uma aeronave. Outra alternativa é a utilização de simuladores GNSS, sendo necessário, nesse caso, o conhecimento *a priori* das condições ionosféricas atuantes na região do GBAS.

Para a determinação da velocidade de uma frente ionosférica, divide-se a distância linear entre duas estações pela diferença de tempo em que ocorre o atraso ionosférico máximo nessas duas estações para um determinado satélite. Destaca-se que, para a correta determinação da velocidade, é necessário que as estações estejam dispostas na direção de propagação da frente, de modo que uma estação detecte primeiro o atraso ionosférico máximo. Caso contrário, os instantes de ocorrências dos atrasos máximos serão aproximadamente iguais nas duas estações e, dependendo da distância entre elas, pode proporcionar valores extrapolados. A equação (46) apresenta o cálculo de V_{iono} :

$$V_{\text{iono}} = \frac{D_{r1r2}}{|t_{r1\text{máx}}^s - t_{r2\text{máx}}^s|} \quad (46)$$

onde:

D_{r1r2} – distância linear entre a estação 1 (r1) e a estação 2 (r2), em metros;

$t_{r1\text{máx}}^s$ – instante em que ocorre o atraso ionosférico máximo na estação 1 (r1) referente ao satélite (s), em segundos; e

$t_{r2\text{máx}}^s$ – instante em que ocorre o atraso ionosférico máximo na estação 2 (r2) referente ao satélite (s), em segundos.

A extensão da frente ionosférica, por sua vez, é dada pela equação (47), sendo preferencialmente convertido em quilômetros:

$$W_{\text{iono}} = (V_{\text{iono}} - V_{\text{IPP}}) \cdot |t_{r\text{máx}}^s - t_{r\text{min}}^s| \quad (47)$$

onde:

V_{IPP} – velocidade do IPP, em m/s;

$t_{r\text{máx}}^s$ – instante em que ocorre o atraso ionosférico máximo na estação (r) referente ao satélite (s), em segundos; e

$t_{r\text{min}}^s$ – instante em que ocorre o atraso ionosférico mínimo na estação (r) referente ao satélite (s), em segundos.

Repara-se que há a necessidade de determinar a velocidade do IPP para o cálculo da extensão, pois os deslocamentos do satélite e da frente ionosférica podem não ser no mesmo sentido. A equação (48) mostra como determinar o V_{IPP} :

$$V_{\text{IPP}} = \frac{D_{\text{IPP}}}{t_{\text{IPP}}} \quad (48)$$

sendo:

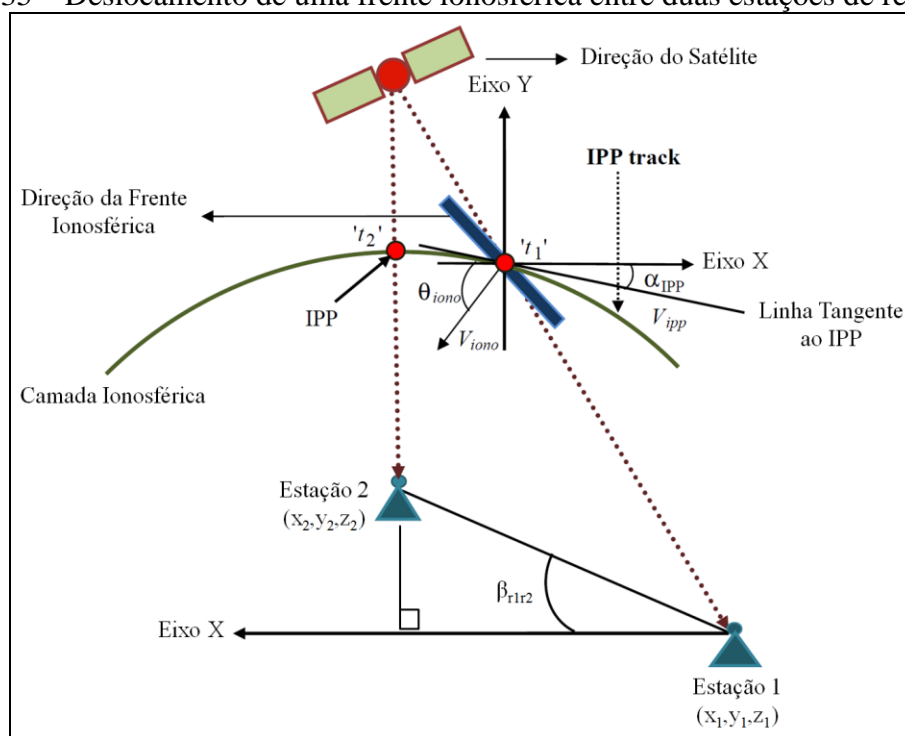
D_{IPP} – distância entre os IPP referente aos instantes t_1 e t_2 para um mesmo satélite, em metros; e

t_{IPP} – diferença de tempo entre os instantes t_1 e t_2 , em segundos.

Já o valor máximo de atraso ionosférico que pode haver em um modelo de risco pode ser obtido a partir da multiplicação da extensão máxima da frente ionosférica pelo gradiente ionosférico máximo obtido, ou estimando os atrasos a partir de valores de TEC.

Embora não seja considerado como um parâmetro, pode-se determinar também a direção de deslocamento da frente ionosférica (θ_{iono}). Analisando a Figura 35, a qual representa o deslocamento da frente ionosférica entre duas estações, nota-se que: o satélite e a frente estão se movendo em direções opostas, t_1 e t_2 representam os instantes de interceptação dos sinais do satélite pela frente ionosférica nas estações 1 e 2, respectivamente, α_{IPP} é o ângulo de direção do IPP e β_{r1r2} é o ângulo horizontal entre o vetor que une as duas estações e o eixo X.

Figura 35 – Deslocamento de uma frente ionosférica entre duas estações de referência.



Fonte: Adaptado de Srinivas et al. (2014).

Embora sejam necessárias três estações para a determinação da direção, Ene et al. (2005) desenvolveram um método que utiliza apenas duas, cujo modelo é dado por:

$$\theta_{\text{iono}} = \arccos \left(\frac{D_{r1r2} \cdot \cos \beta_{r1r2}}{|t_{r1\text{máx}}^s - t_{r2\text{máx}}^s| \cdot V_{\text{iono}}} - \frac{V_{\text{IPP}} \cdot \sin \alpha_{\text{IPP}}}{V_{\text{iono}}} \right) \quad (49)$$

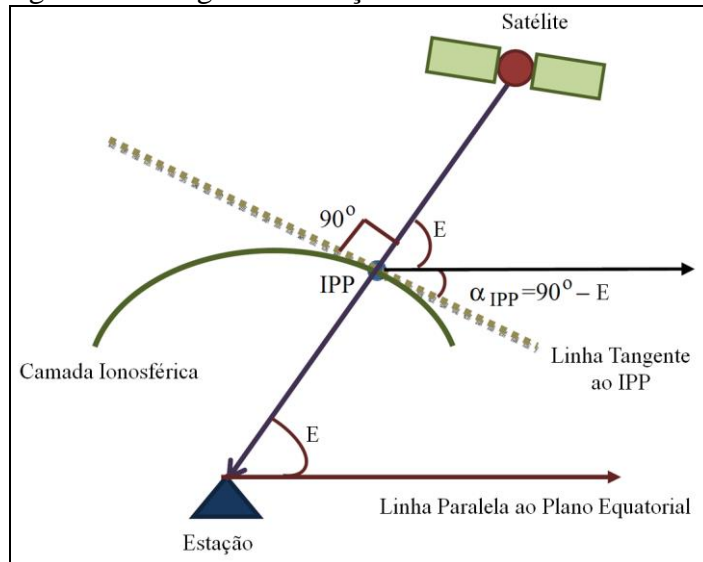
Na equação (49), as únicas incógnitas restantes para a determinação da direção da frente ionosférica são β_{r1r2} e α_{IPP} . O cálculo de β_{r1r2} é realizado a partir da aplicação do cosseno no triângulo retângulo formado pelas estações 1 e 2:

$$\beta_{r1r2} = \arccos \left(\frac{x_2 - x_1}{D_{r1r2}} \right) = \arccos \left(\frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \right) \quad (50)$$

Já o ângulo de direção do IPP (α_{IPP}) é apresentado pela equação (51), onde E representa o ângulo de elevação do satélite. A demonstração da equação é representada na Figura 36.

$$\alpha_{\text{IPP}} = 90^\circ - E \quad (51)$$

Figura 36 – Ângulo de direção de deslocamento do IPP.



Fonte: Adaptado de Srinivas et al. (2014).

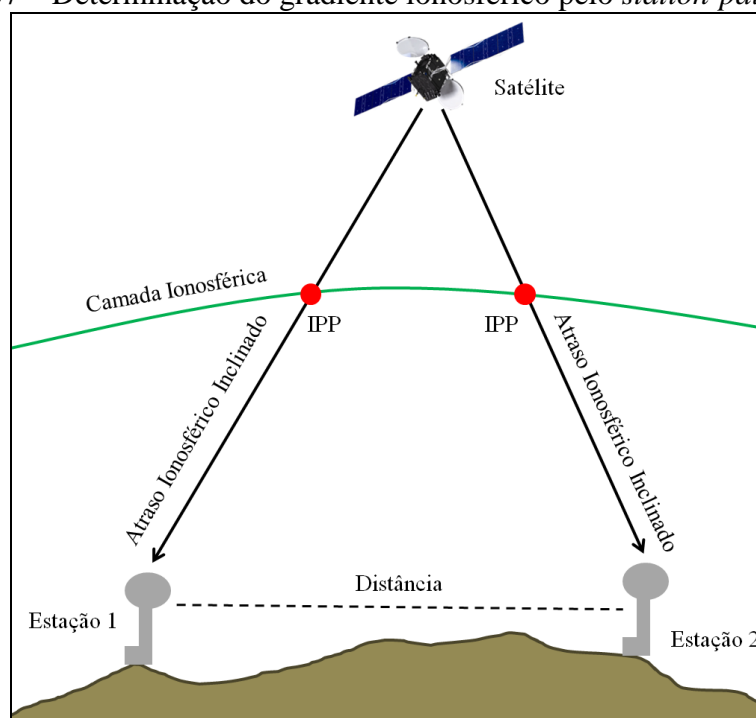
4.3 Métodos de Determinação do Gradiente Ionosférico

Gradientes ionosféricos podem ser estimados a partir de dois métodos: *station-pair method* (método dos pares de estações) e o *time-step method* (método do passo do tempo), os quais se diferenciam a partir das configurações de estações e de satélites (LEE et al., 2007).

4.3.1 Station-Pair Method

O *station-pair method* trata cada par de estações de uma rede de monitoramento contínuo como um GBAS e um receptor de uma aeronave (LEE et al., 2007). Os pares são configurados de tal forma que as estações de um par rastreiem um conjunto de satélites concomitantemente, conforme representa a Figura 37.

Figura 37 – Determinação do gradiente ionosférico pelo *station-pair method*.



Fonte: Adaptado de Lee et al. (2007).

Para um determinado instante, a estimativa do gradiente ionosférico inclinado para um satélite (g^s) se dá pela razão entre o módulo da diferença dos atrasos ionosféricos inclinados pela distância de separação entre as estações, conforme apresenta a equação (52) (SRINIVAS et al., 2014):

$$g^s = \frac{|I_{r1}^s - I_{r2}^s|}{D_{r1r2}} \quad (52)$$

onde:

I_{r1}^s – atraso ionosférico inclinado referente à estação 1 (r1) e ao satélite (s), em milímetros; e

I_{r2}^s – atraso ionosférico inclinado referente à estação 2 (r2) e ao satélite (s), em milímetros.

O gradiente ionosférico é normalmente expresso em mm/km, embora o sistema LAAS utilize o m/m (RTCA, 2005 apud SRINIVAS et al., 2014). Uma variante que pode ocorrer é a não utilização do módulo na diferenciação dos atrasos, proporcionando dessa maneira gradientes negativos e positivos.

Outra possibilidade de estimar os gradientes inclinados consiste em, ao invés de dividir o termo $|I_{r1}^s - I_{r2}^s|$ pela distância entre as estações terrestres (D_{r1r2}), dividir pela distância entre os IPP referentes ao par de estações ($D_{IPP_{r1r2}}$) (LEE et al., 2007).

Já para determinar o gradiente ionosférico vertical referente a um determinado satélite (g_v^s) deve-se, primeiramente, transformar os atrasos ionosféricos inclinados em atrasos verticais, a partir do uso do fator de obliquidade, dado pelo inverso da equação (44).

Devido à pequena magnitude dos gradientes ionosféricos nominais (gradientes obtidos quando o comportamento da ionosfera é não perturbado), tem-se que os valores dos mesmos podem ser facilmente influenciados por ruídos, erros ou tendências (LEE et al., 2007). Uma tendência típica é a de inter-frequência (IFB – *Interfrequency Bias*), também denominada de DCB (*Differential Code Bias*), resultante de atrasos entre duas portadoras no *hardware* do receptor e do satélite. Como as duas estações estão rastreando o mesmo satélite, o erro devido ao DCB do satélite é eliminado quando se realiza a diferenciação, ao contrário do DCB dos receptores, que necessitam ser estimados.

4.3.2 *Time-Step Method*

O *time-step method* foi desenvolvido com o intuito de aumentar a amostragem de gradientes ionosféricos, bem como obter gradientes com distâncias menores que a separação física das estações da rede (DATTA-BARUA et al., 2002).

O método agrupa um único satélite e uma única estação como um par, conforme mostra a Figura 38. O atraso ionosférico (inclinado ou vertical) entre o satélite e o receptor da estação em um instante t_1 é comparado com o atraso do mesmo par em um instante posterior t_2 . O gradiente é então calculado pela divisão entre o valor absoluto da diferença dos atrasos dos instantes t_1 e t_2 pela distância entre os IPP referentes aos instantes t_1 e t_2 . A equação (53) apresenta o cálculo do gradiente:

$$g^s = \frac{|I_{rt_1}^s - I_{rt_2}^s|}{D_{IPP_{t_1 t_2}}} \quad (53)$$

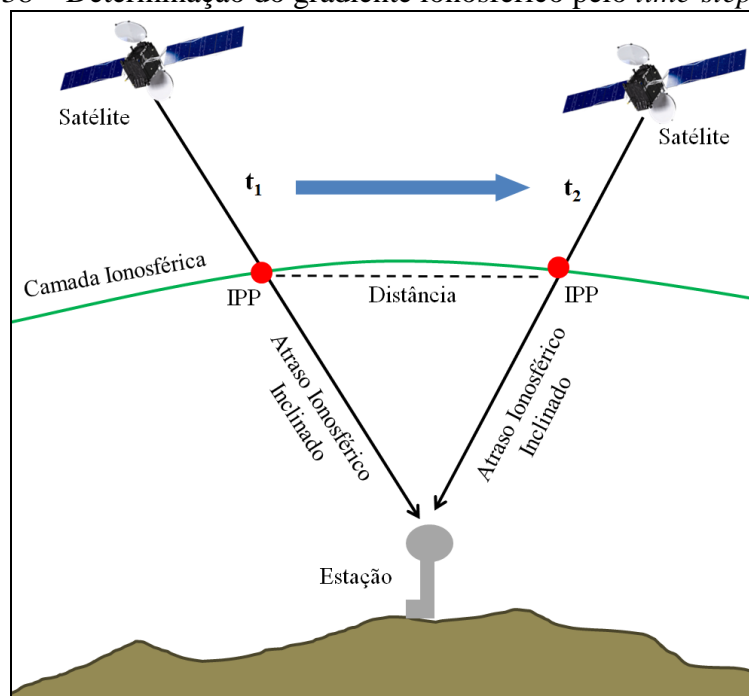
onde:

$I_{rt_1}^s$ – atraso ionosférico para o instante t_1 , em milímetros;

$I_{rt_2}^s$ – atraso ionosférico para o instante t_2 , em milímetros; e

$D_{IPP_{t_1 t_2}}$ – distância entre os IPP dos instantes t_1 e t_2 , em quilômetros.

Figura 38 – Determinação do gradiente ionosférico pelo *time-step method*.



Fonte: Adaptado de Lee et al. (2007).

A partir dessa configuração de satélite-estação, pode-se obter gradientes ionosféricos com distâncias menores que 40 km apenas controlando o intervalo de tempo (Δt)

= $t_2 - t_1$) das determinações dos atrasos. Testes realizados indicam que um Δt de 30 segundos proporciona $D_{IPP_{t12}}$ da ordem de 10 km, dependendo do ângulo de elevação. Gradientes provenientes de distâncias menores que 40 km são considerados ideais para as aplicações GBAS (LEE et al., 2007; DATTA-BARUA et al., 2002).

Um aspecto negativo do método é que tem pouca semelhança, em termos de arquitetura, com a configuração de um GBAS e uma aeronave que se aproxima, sendo assim não muito intuitivo para os usuários relacionar o *time-step method* com as aplicações GBAS. Entretanto, a presente configuração consegue dimensionar, aproximadamente, o mesmo efeito ionosférico determinado pelo *station-pair method* (LEE et al., 2007). Adicionalmente melhora a precisão, pois a diferenciação temporal no caso da fase da portadora elimina a ambiguidade do satélite.

Quando se diferenciam os atrasos provenientes de um mesmo satélite e de uma mesma estação, ambos os erros devidos aos DCB do satélite e do receptor também são eliminados. No entanto, o *time-step method* introduz outra fonte de erro: a decorrelação temporal. Embora os atrasos de diferentes instantes sejam utilizados para determinar a decorrelação espacial ionosférica, os gradientes estimados incluem uma mistura de gradientes espaciais e temporais, sendo a distinção difícil de ser obtida (LEE et al., 2007).

4.4 Procedimento Geral para a Estimativa dos Parâmetros e Avaliação do Modelo CONUS de Risco Ionosférico

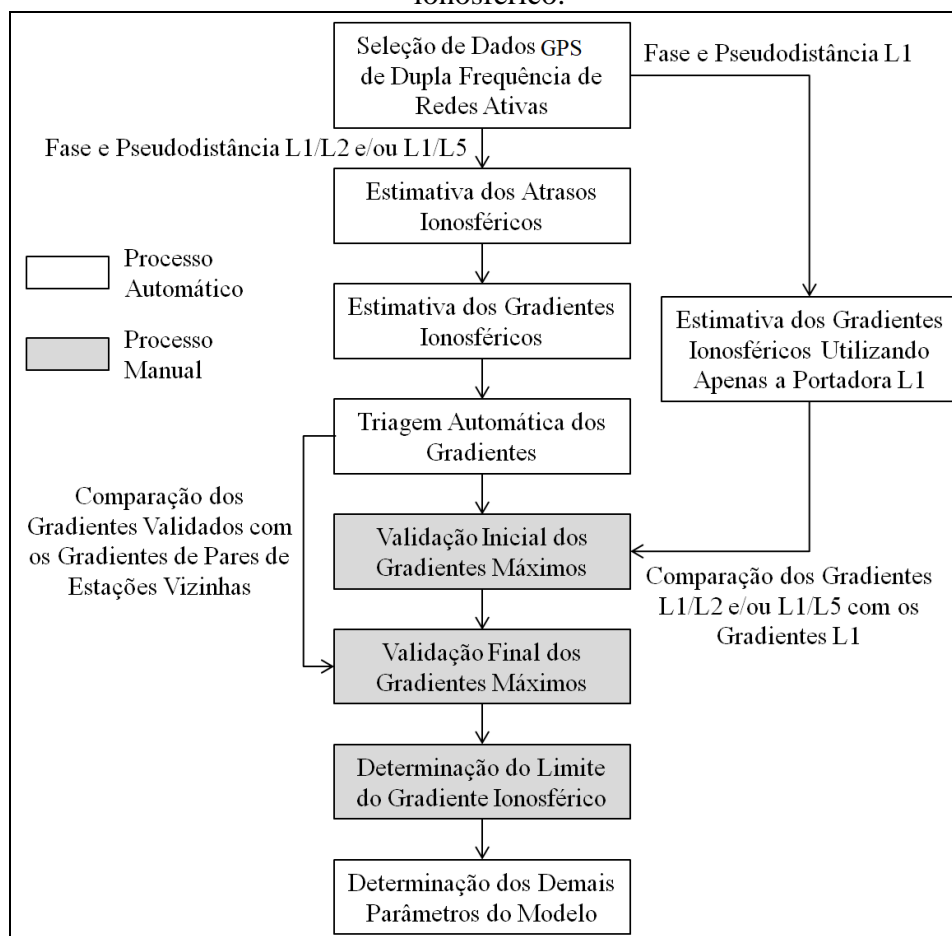
A estimativa dos parâmetros e, conseqüentemente, avaliação do *CONUS Threat Model* pode ser decomposta em vários processos automáticos e manuais. Datta-Barua et al. (2010), para elaborar o modelo de risco norte-americano, arquitetaram um procedimento geral para a obtenção dos parâmetros do modelo, apresentado em forma de fluxograma na Figura 39.

As especificações de cada processo, seja automático ou manual, são apresentadas nas subseções a seguir, podendo ser consultadas com mais detalhes em Pereira et al. (2017).

Kim et al. (2015), fazendo uso desse procedimento e com algumas modificações, avaliaram o uso do *CONUS Threat Model* na Coreia do Sul. Os autores denominaram as estimativas dos parâmetros do CONUS no território sul-coreano de *Korean Threat Model*. É importante destacar que, ao avaliaram a aplicabilidade do modelo norte-

americano em determinados países, os pesquisadores e/ou instituições adquiriram o hábito de nomear tais avaliações como “novos” modelos de risco, sendo que na realidade trata-se de estimativas dos valores dos parâmetros do modelo do CONUS para uma determinada região de interesse.

Figura 39 – Procedimento geral para a estimativa dos parâmetros do modelo CONUS de risco ionosférico.



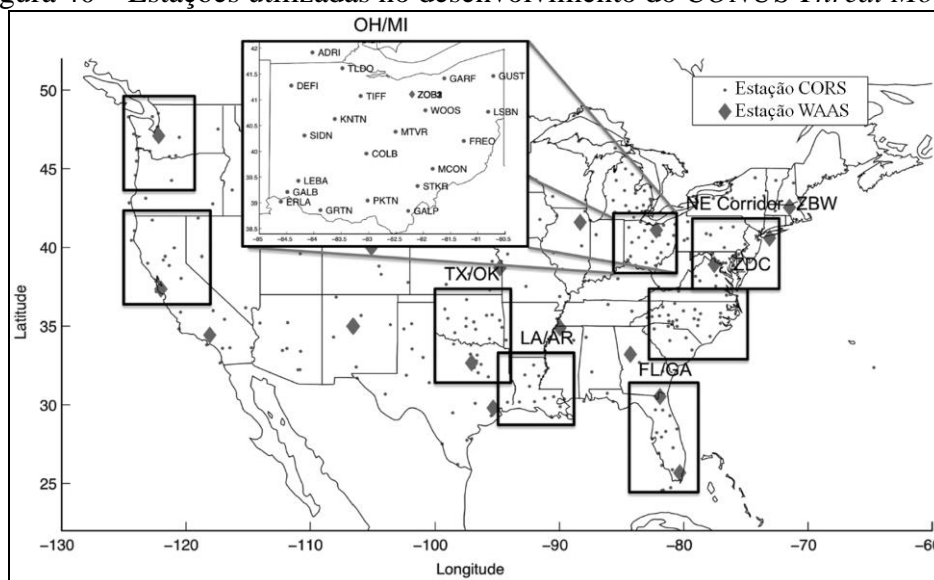
Fonte: Adaptado de Datta-Barua et al. (2010).

4.4.1 Seleção de dados GPS de dupla frequência de redes ativas

Dados GPS de dupla frequência são necessários para a estimativa dos atrasos ionosféricos e, por conseguinte, dos parâmetros do modelo. Para que os parâmetros retratem corretamente as condições ionosféricas de uma determinada região, é necessário que as separações das estações selecionadas sejam próximas a dezenas de quilômetros e que a disposição das estações seja de tal forma que cubra toda a região. Para exemplificar, a Figura

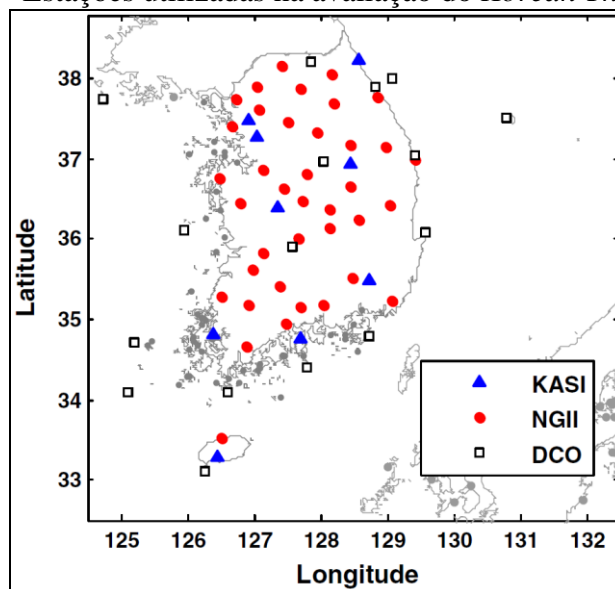
40 apresenta as estações CORS selecionadas para o desenvolvimento do *CONUS Threat Model* e a Figura 41 as estações utilizadas na avaliação do *Korean Threat Model*.

Figura 40 – Estações utilizadas no desenvolvimento do *CONUS Threat Model*.



Fonte: Adaptado de Datta-Barua et al. (2010).

Figura 41 – Estações utilizadas na avaliação do *Korean Threat Model*.



Fonte: Kim et al. (2015).

Além da escolha das estações das redes ativas deve-se selecionar dias em que o comportamento da ionosfera seja anômalo, de preferência durante os ciclos solares 23 e 24, para que o pior cenário em termos de erros ionosféricos seja representado pelo modelo.

Para a seleção de dias anômalos pode-se utilizar os índices geomagnéticos K_p e D_{st} , devido à alta correlação da atividade geomagnética com a atividade ionosférica em regiões de médias latitudes. Jung e Lee (2012) estabeleceram os seguintes critérios de seleção de dias com base nos valores de tais índices: valor máximo de K_p próximo de 6,0 e valor mínimo de D_{st} próximo de -200 nT. Esses critérios são utilizados para discriminar, de forma conservadora, todos os potenciais períodos de tempestade ionosférica em regiões de médias latitudes, minimizando assim a carga computacional de processamento de dados por meio da não seleção de dias em que não há tempestades (JUNG; LEE, 2012).

Apesar de serem efetivos, os índices geomagnéticos não conseguem identificar todas as sutis perturbações na ionosfera equatorial e de baixas latitudes, principalmente na região brasileira. Assim, pesquisadores do INPE e do *Boston College* sugerem o uso do índice de cintilação de amplitude S4 (além do K_p e D_{st}) para identificar as atividades ionosféricas após o pôr do Sol na região equatorial e de baixas latitudes. Um critério adotado é selecionar os dias em que o valor máximo do índice S4 é próximo de 1,0, o que representa forte cintilação ionosférica (USTDA, 2015).

4.4.2 Estimativa dos atrasos ionosféricos

Os atrasos ionosféricos podem ser estimados a partir do uso dos sinais de receptores de dupla ou tripla frequência, os quais estão submetidos aos efeitos dispersivos da camada ionosférica. Reescrevendo os modelos funcionais da pseudodistância (equação (3)) e da fase da portadora (equação (4)) para as portadoras L1 e L2 do GPS e realizando algumas substituições obtêm-se (KIM et al., 2015):

$$PD_{rL1}^s = r_r^s + I_r^s + v_{PD_{L1}} \quad (54)$$

$$PD_{rL2}^s = r_r^s + \gamma I_r^s + v_{PD_{L2}} \quad (55)$$

$$\Phi_{rL1}^s = r_r^s - I_r^s + N_{rL1}^s + v_{\Phi_{L1}} \quad (56)$$

$$\Phi_{rL2}^s = r_r^s - \gamma I_r^s + N_{rL2}^s + v_{\Phi_{L2}} \quad (57)$$

onde:

r_r^s – soma da distância geométrica entre o satélite e o receptor, do erro do relógio do receptor, do erro do relógio do satélite, do erro devido à troposfera, do erro devido ao multicaminho e do erro da posição do satélite;

- γ – fator de proporcionalidade para a conversão do atraso ionosférico na portadora L2 para a portadora L1, dado por f_{L1}^2/f_{L2}^2 ;
- N_{rL1}^s – ambiguidade do satélite para a portadora L1; e
- N_{rL2}^s – ambiguidade do satélite para a portadora L2.

Dessa forma, o atraso ionosférico inclinado na portadora L1 (I_r^s) pode ser estimado utilizando tanto as medidas de pseudodistância quanto as medidas de fase nas portadoras L1 e L2, conforme apresentam as equações (58) e (59), respectivamente (KIM et al., 2015):

$$I_{rPD}^s = \frac{PD_{rL2}^s - PD_{rL1}^s}{\gamma - 1} = I_r^s + \frac{c}{\gamma - 1} (DCB_r + DCB^s) + v_{PD} \quad (58)$$

$$I_{r\Phi}^s = \frac{\Phi_{rL1}^s - \Phi_{rL2}^s}{\gamma - 1} = I_r^s + \frac{c}{\gamma - 1} (DCB_r + DCB^s) + \frac{N_{rL1}^s - N_{rL2}^s}{\gamma - 1} + v_{\Phi} \quad (59)$$

sendo:

DCB_r – tendência diferencial no receptor, que ocorre na combinação entre as portadoras; e

DCB^s – tendência diferencial no satélite, que ocorre na combinação entre as portadoras.

As estimativas do atraso a partir da pseudodistância são mais ruidosas que as derivadas de medidas de fase, pois a observável fase da portadora apresenta erros de multicaminho e ruídos térmicos menores que os da pseudodistância, ou seja, $v_{\Phi} \ll v_{PD}$ (KIM et al., 2015; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Portanto, utiliza-se $I_{r\Phi}^s$ para obter I_r^s , dado por:

$$I_r^s = \frac{\Phi_{rL1}^s - \Phi_{rL2}^s}{\gamma - 1} - \frac{c}{\gamma - 1} (DCB_r + DCB^s) - \frac{N_{rL1}^s - N_{rL2}^s}{\gamma - 1} \quad (60)$$

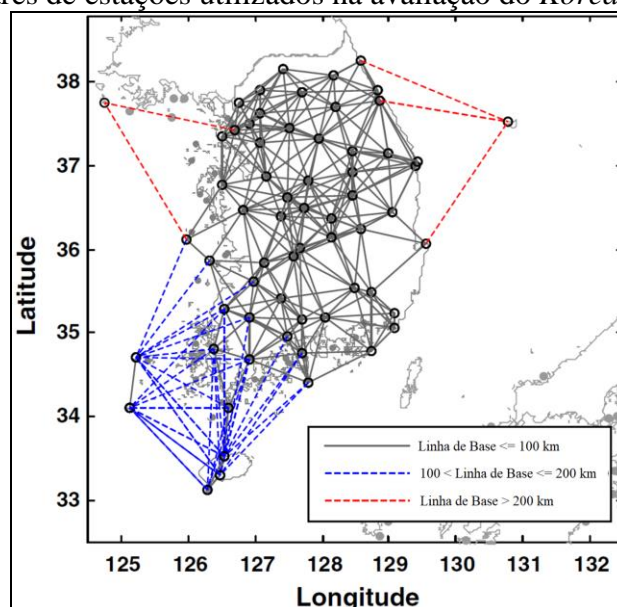
No desenvolvimento do *CONUS Threat Model*, as medidas de atraso ionosférico foram estimadas pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) a partir do algoritmo de processamento *Supertruth*, descrito por Komjathy et al. (2005) e Komjathy et al. (2004). Nesse algoritmo, os dados GPS de dupla frequência são processados utilizando o GIM (*Global Ionospheric Mapping*) e o módulo SanEdit do GIPSY-OASIS, com o intuito de

detectar perdas de ciclos e estimar os DCB do satélite e do receptor. Os atrasos ionosféricos provenientes do *Supertruth* são de alta precisão. Entretanto, a abordagem pós-processada do algoritmo demanda muito tempo de execução, não sendo propício o seu uso em aplicações de tempo quase real (KIM et al., 2015). Nesse sentido, Jung e Lee (2012) desenvolveram o algoritmo *Simple Truth*, mais simples e rápido que o processamento do *Supertruth*. Um dos principais diferenciais do *Simple Truth* é a estimativa e remoção dos DCB do satélite e do receptor, sendo as tendências dos satélites obtidas pelos valores disponibilizados pelos diversos serviços internacionais GNSS, como o IGS e o CODE, e a tendência do receptor determinada a partir do método proposto por Ma e Maruyama (2003).

4.4.3 Estimativa dos gradientes ionosféricos

O *CONUS Threat Model*, bem como, os demais “modelos” desenvolvidos utilizam o *station-pair method* para a obtenção dos gradientes, em grande parte devido à arquitetura do método e à ausência da influência da decorrelação temporal existente no *time-step method*. A Figura 42 apresenta, por exemplo, os pares de estações formados utilizando as estações sul-coreanas.

Figura 42 – Pares de estações utilizados na avaliação do *Korean Threat Model*.

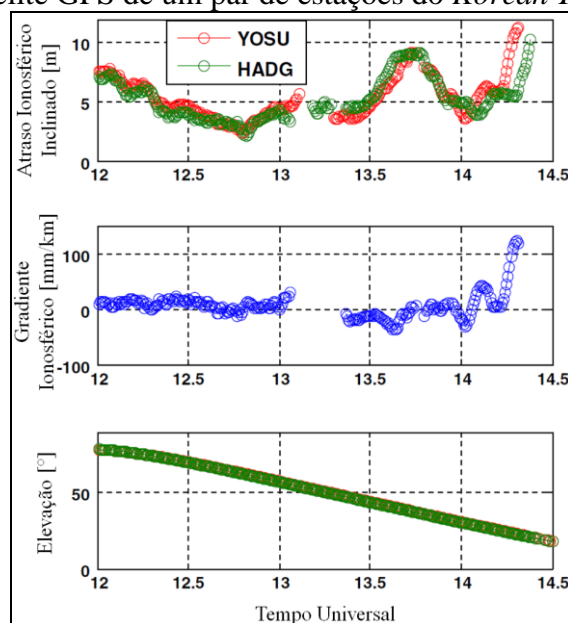


Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Uma forma de visualizar e analisar os gradientes ionosféricos estimados para um par é por meio da comparação simultânea entre o gráfico dos atrasos ionosféricos

inclinados das estações do par, o gráfico das elevações do satélite em cada estação e o próprio gráfico do gradiente ionosférico. Nesse sentido, a Figura 43 mostra exemplos de resultados obtidos do par YOSU-HADG (distância de 44,95 km) para o satélite GPS G31 durante o período entre 12h e 14h30 TU do dia 10 de novembro de 2004.

Figura 43 – Exemplo de resultados de atraso ionosférico, gradiente ionosférico e elevação para um satélite GPS de um par de estações do *Korean Threat Model*.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Verifica-se pela Figura 43 que, próximo às 14h15 TU, o gradiente ionosférico aumenta de 0 mm/km para, aproximadamente, 110 mm/km, decorrente de uma elevação do atraso na estação YOSU para mais de 10 m, devido à propagação do sinal por uma região de irregularidades ionosféricas, ao contrário do atraso na estação HADG, que permaneceu próximo de 5 m no mesmo instante.

Pode-se extrair também da Figura 43 que a falta de dados de dupla frequência influencia na estimativa dos atrasos, que, por sua vez, provocam uma descontinuidade nos valores dos gradientes.

4.4.4 Triagem automática dos gradientes

Estimados os gradientes para todos os pares de estações, satélites visíveis e épocas, um processo automático seleciona todos os gradientes que excedem um determinado limiar: 100 mm/km, de acordo com Datta-Barua et al. (2010) ou 60 mm/km, baseado em Kim

et al. (2015). A grande maioria dos gradientes inferiores ao limiar não são devidos a eventos ionosféricos significativos, mas causados por falhas nos receptores e/ou erros de processamento.

Os casos em que duas estações são muito próximas (distância de separação menor que 100 m) ou quando não há variação em amplitude dos gradientes em relação ao tempo, tem-se que tais gradientes são oriundos de erros nos receptores e eliminados no processo automático. Outros casos em que as medidas de atraso ionosférico de uma estação não variam no tempo e as medidas da outra estação variam são atribuídas a falhas no receptor, também eliminados no processo (DATTA-BARUA et al., 2010).

Os gradientes cuja taxa de variação do atraso ionosférico é superior a 15 mm/s são classificados como, provavelmente, provenientes de efeitos da camada ionosférica. O limiar de 15 mm/s é definido como sendo uma ordem de grandeza menor que a maior taxa de variação determinada para a tempestade ionosférica do dia 29 de outubro de 2003 (DATTA-BARUA, 2004). A vantagem do uso desse limiar é que os reais eventos ionosféricos são menos susceptíveis de serem eliminados como falsos negativos. A desvantagem é que falsos alarmes podem ocorrer quando há perdas de ciclos, fazendo com que o valor do atraso salte de repente entre dois instantes. Esses casos têm de ser eliminados manualmente após a triagem automática (DATTA-BARUA et al., 2010).

4.4.5 Validação dos gradientes

Como a triagem automática não descarta todos os gradientes que não são devidos a eventos ionosféricos, é necessário examinar manualmente todos os gradientes máximos selecionados, com o objetivo de comprovar que os eventos observados são, de fato, eventos ionosféricos anômalos. Dois tipos de validações são realizados (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010):

- Validação Inicial dos Gradientes Máximos: comparação dos gradientes provenientes de dados de dupla frequência com os gradientes estimados apenas com a portadora L1; e
- Validação Final dos Gradientes Máximos: comparação dos gradientes de pares de estações vizinhas.

Estimativas utilizando dados de dupla frequência são mais propensas a erros de descontinuidade de rastreamento e perdas de ciclos, devido às características inerentes da

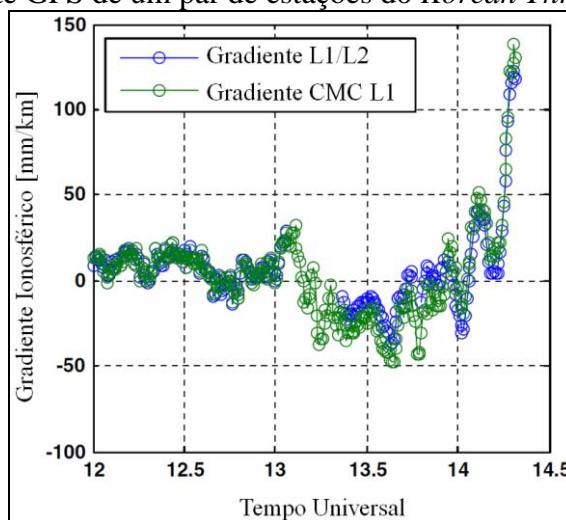
portadora L2, ao contrário dos gradientes estimados de atrasos utilizando apenas a pseudodistância e a fase na portadora L1 (CMC – *Code Minus Carrier*), dados pela equação (61), os quais são mais robustos em relação à falta de dados e perdas de ciclos (KIM et al., 2015).

$$I_{rCMC}^s = \frac{PD_{rL1}^s - \Phi_{rL1}^s}{2} + \frac{N_{rL1}^s}{2} \quad (61)$$

Assim, os gradientes de dupla frequência são comparados com os gradientes CMC, para os mesmos pares de estações, satélites e instantes. Se as estimativas de dupla e simples frequência apresentam um alto grau de concordância, com respeito aos padrões dos valores em função do tempo, da magnitude e dos instantes de ocorrência dos gradientes máximos, o gradiente de dupla frequência em análise é declarado validado parcialmente, ficando dependente da validação a partir da comparação dos gradientes de pares de estações vizinhas.

Exemplo de comparação dos gradientes de simples (L1) e de dupla (L1/L2) frequência é apresentado na Figura 44, sendo os gradientes L1/L2 os mesmos apresentados na Figura 43 para o par YOSU-HADG.

Figura 44 – Exemplo de resultados de gradiente de dupla frequência e de gradiente CMC para um satélite GPS de um par de estações do *Korean Threat Model*.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

As descontinuidades presentes nas estimativas de dupla frequência não existem nas estimativas usando somente a L1, corroborando o fato de que a falta de dados é

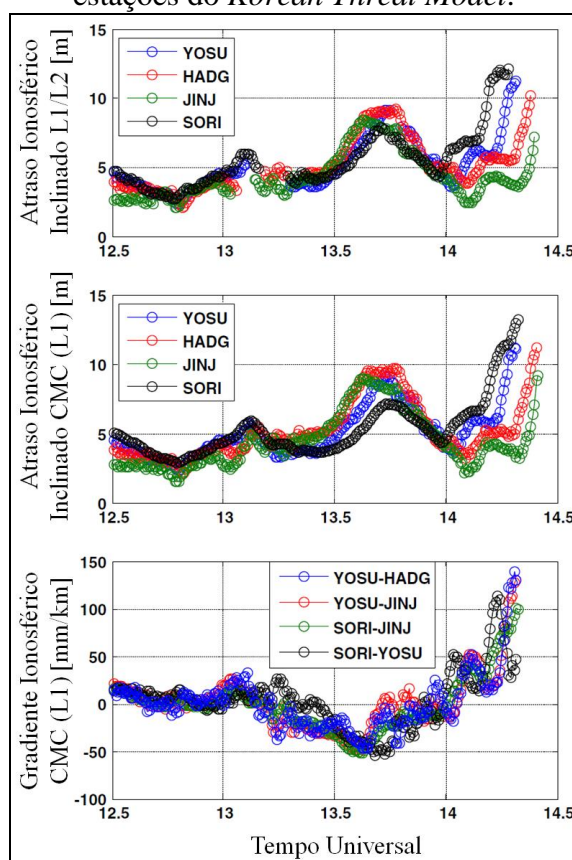
limitada apenas a portadora L2. Como os dois tipos de gradientes apresentam um comportamento similar ao longo do tempo, pode-se concluir que o evento em análise é devido a uma anomalia ionosférica.

Quando os valores dos gradientes L1/L2 e L1 forem muito discrepantes, devem-se considerar os gradientes CMC como os válidos para essa fase de validação inicial, devido às estimativas CMC ser mais confiáveis (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010).

Conforme foi apresentado, a validação inicial é realizada em cada par de estações individualmente, fato esse que não permite a identificação de possíveis erros relacionados ao receptor, de falsas anomalias ionosféricas causadas por erros de processamento, ou ainda de erros no processo de estimação do DCB do receptor. Dessa forma, é necessária a realização de uma validação final, sendo os gradientes validados parcialmente para cada par comparado com os gradientes de pares de estações vizinhas. Alternativamente, pode-se, também, comparar os valores de atrasos que proporcionam os gradientes validados com os atrasos de estações vizinhas. Se os pares de estações nas proximidades do par em estudo apresentar um comportamento de gradientes ou de atrasos similares, é mais provável que o evento observado seja de origem ionosférica do que resultante de falha ou erro em um receptor. Caso contrário, dificilmente a falha ou erro acometeria todos os receptores na circunvizinhança (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010).

Seguindo a sequência de exemplos, a Figura 45 mostra os valores de atrasos ionosféricos inclinados L1/L2 e L1 das estações em análise YOSU e HADG, além dos valores para as estações vizinhas JINJ e SORI, bem como o gradiente CMC para quatro pares de estações, incluindo YOSU-HADG. Nota-se que os resultados apresentam um comportamento similar ao longo do tempo, permitindo concluir, definitivamente, que os gradientes ionosféricos máximos obtidos para o par YOSU-HADG são devidos a eventos ionosféricos.

Figura 45 – Exemplo de resultados de atraso ionosférico inclinado em L1 obtido a partir da combinação L1/L2, CMC e gradiente ionosférico CMC para um satélite GPS de quatro estações do *Korean Threat Model*.



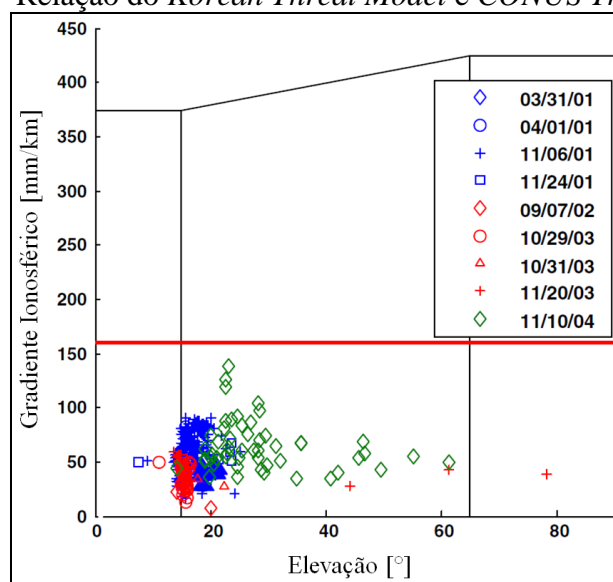
Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

4.4.6 Determinação do limite do gradiente ionosférico e estimativa dos demais parâmetros do modelo

Analisados e validados os gradientes ionosféricos para todos os dias anômalos selecionados, determinam-se os limites máximos por meio da plotagem dos gradientes em função do ângulo de elevação dos satélites. Os limites são ajustados aos pontos do gráfico, de forma a limitar superiormente o espaço de risco. Caso seja observada uma relação entre os gradientes e a elevação dos satélites, o limite pode ser separado em retas horizontais e inclinadas. Diferentemente, quando não há relação o limite é representado por uma simples reta horizontal, ou seja, por uma constante. Ressalva-se que, antes da definição dos limites, uma margem conservadora (geralmente 15%) é adicionada aos valores dos gradientes validados, com o intuito de contemplar os erros de medidas e de processamento de dados ocorridos durante o desenvolvimento do modelo (KIM et al., 2015; DATTA-BARUA et al., 2010).

Na Figura 46 são apresentados os gradientes ionosféricos validados para a região da Coreia do Sul, bem como o limite máximo dos gradientes representado por uma constante de 160 mm/km (linha vermelha). A Figura 46 também mostra os limites do *CONUS Threat Model*, representados por três retas pretas em função da elevação.

Figura 46 – Relação do *Korean Threat Model* e *CONUS Threat Model*.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2015).

Caso os valores dos gradientes estimados, para uma determinada região, sejam inferiores aos limites do *CONUS Threat Model* pode-se avaliar que o GBAS SLS-4000 da Honeywell, provavelmente, atende aos requisitos de integridade para aproximações precisas de aeronaves nessa região, pois esse tipo de GBAS foi desenvolvido tendo como referência o *CONUS Threat Model*. O caso supracitado aplica-se ao território sul-coreano.

Os demais parâmetros do modelo de risco (velocidade e extensão da frente ionosférica e valor máximo de atraso ionosférico) são obtidos para os períodos em que os gradientes ionosféricos máximos são validados, sendo as equações apresentadas na seção 4.2.

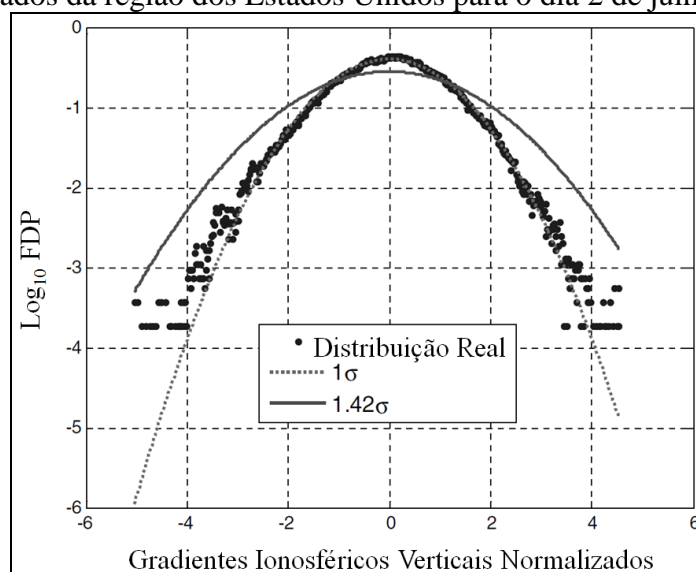
4.5 Determinação do Desvio-Padrão do Gradiente Ionosférico Vertical

A estimativa dos níveis de proteção da aeronave requer, dentre os vários parâmetros envolvidos no modelo de erro da equação (30), o conhecimento do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical (σ_{vig}), o qual expressa a variação do gradiente entre a estação de referência e a aeronave (KIM et al., 2015).

Kolb et al. (2005) e Datta-Barua et al. (2002) após analisarem dados de gradientes ionosféricos verticais para regiões da Alemanha e dos Estados Unidos, respectivamente, obtiveram o valor de 1 mm/km (1σ) para σ_{vig} em dias nominais ou “calmos”. Entretanto, esse valor não é rigoroso o suficiente para garantir que os níveis de proteção atendam aos requisitos de navegação aérea devido a dois motivos. Primeiro: o método descrito para o cálculo dos níveis de proteção assume média zero e distribuição gaussiana para a decorrelação espacial ionosférica, sendo que os gradientes ionosféricos não apresentam, necessariamente, média zero e distribuição normal. Segundo: um GBAS não consegue distinguir condições ionosféricas nominais de anômalas em tempo real. Dessa forma, é necessário que o valor de σ_{vig} transmitido contemple todas as condições ionosféricas (LEE et al., 2007).

Nesse cenário, Lee et al. (2007) desenvolveram um método para estimar o desvio-padrão do gradiente vertical de forma mais rigorosa, denominado de *Sigma Overbounding Method*. O método consiste em analisar as funções de densidade de probabilidade (FDP) de gradientes ionosféricos verticais normalizados, obtidos para dias com atividades ionosféricas fracas e intensas, com o objetivo de determinar um fator de inflação (f – fator de escala), que após multiplicar a distribuição gaussiana $N(0,1\sigma)$ obtém uma distribuição que se adeque de fato à real distribuição dos gradientes. Os passos do método são descritos a seguir. Inicialmente, os gradientes verticais são divididos em intervalos (blocos) de acordo com as distâncias das estações que formam os pares, ou seja, em intervalos de 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km, 200-250 km e outros, por exemplo. Em seguida, a média (μ_{vig}) e o desvio-padrão (σ_{vig}) dos gradientes ionosféricos verticais são calculados para cada intervalo e utilizados para normalizar os gradientes de cada bloco. Assim, com base na FDP dos gradientes ionosféricos verticais normalizados, determina-se o fator de inflação (f) para cada intervalo utilizando conceitos de assimetria e curtose. A Figura 47 apresenta o exemplo de uma FDP de gradientes ionosféricos verticais normalizados da região norte-americana para o dia 2 de julho de 2000.

Figura 47 – Função densidade de probabilidade de gradientes ionosféricos verticais normalizados da região dos Estados Unidos para o dia 2 de julho de 2000.



Fonte: Adaptado de Lee et al. (2007).

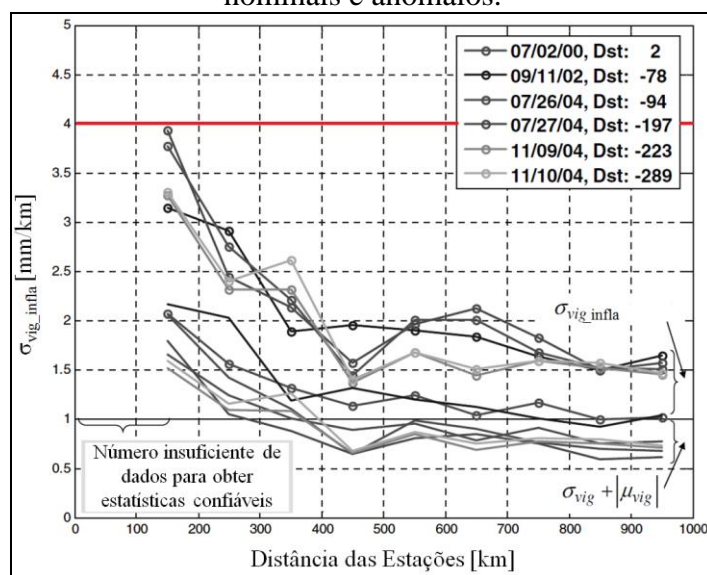
A partir da Figura 47 observa-se que a real distribuição dos dados não possui caudas gaussianas. Dessa forma a distribuição gaussiana $N(0,1\sigma)$ deve ser multiplicada pelo fator de inflação de 1,42 para que as caudas da distribuição real sejam contempladas (LEE et al., 2007).

Por fim, o “ σ_{vig} inflacionado” ($\sigma_{\text{vig_infla}}$) é calculado para cada intervalo utilizando a seguinte equação (LEE et al., 2007):

$$\sigma_{\text{vig_infla}} = |\mu_{\text{vig}}| + f \cdot \sigma_{\text{vig}} \quad (62)$$

Valores de $\sigma_{\text{vig_infla}}$ obtidos para o *CONUS Threat Model*, referentes aos dias ionosféricos nominais e anômalos, são apresentados na Figura 48. Os resultados indicam que um $\sigma_{\text{vig_infla}}$ de 4 mm/km (linha vermelha) é suficiente para atender a todas as condições ionosféricas atuantes no *CONUS Threat Model* (LEE et al., 2007).

Figura 48 – Valores de σ_{vig_infla} do *CONUS Threat Model* referentes aos dias ionosféricos nominais e anômalos.



4.6 Exemplos de Modelos de Risco Ionosférico Avaliados

Os valores dos parâmetros de alguns modelos de risco ionosférico avaliados para determinados países são apresentados nas subseções a seguir.

4.6.1 *CONUS Threat Model*

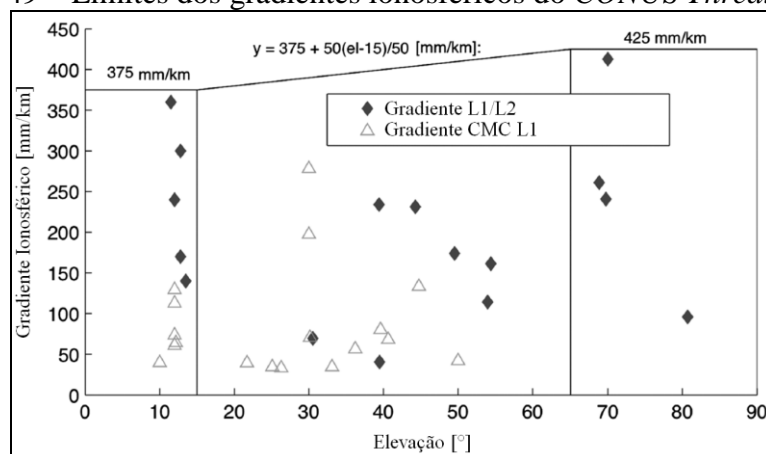
Para o desenvolvimento do *CONUS Threat Model*, foram utilizados dados GPS de dupla frequência de estações da rede CORS referentes a 10 dias entre os anos de 2000 e 2004. Os limites e variações dos parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 13. Já a Figura 49 mostra os limites dos gradientes ionosféricos em forma de gráfico.

Tabela 13 – Limites e variações dos parâmetros do *CONUS Threat Model*.

Parâmetro	Limite ou Variação do Parâmetro
Gradiente Ionosférico Máximo	Elevação < 15° 375 mm/km
	15° < Elevação < 65° 375 + 50*(Elevação – 15°)/50 mm/km
	Elevação > 65° 425 mm/km
Velocidade da Frente Ionosférica	0 – 750 m/s
Extensão da Frente Ionosférica	25 – 200 km
Valor Máximo de Atraso Ionosférico	50 m

Fonte: Datta-Barua et al. (2010).

Figura 49 – Limites dos gradientes ionosféricos do *CONUS Threat Model*.



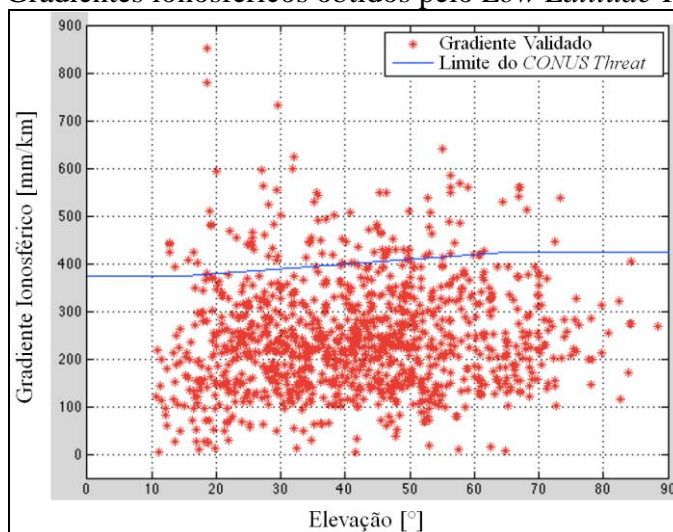
Fonte: Adaptado de Datta-Barua et al. (2010).

4.6.2 Low Latitude Threat Model

A *Mirus Technology* dos Estados Unidos, em conjunto com pesquisadores da FAA, *Stanford University*, *Boston College*, INPE, ICEA e KAIST (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*) realizaram um projeto, entre outubro de 2013 e janeiro de 2015, com o intuito de avaliar, validar e implementar um modelo de risco ionosférico para regiões de baixas latitudes, com base no *CONUS Threat Model*, visando dar suporte às operações GBAS no espaço aéreo brasileiro.

Utilizando dados de 120 dias das estações das redes RBMC, LISN, CIGALA/CALIBRA e ICEA, referentes ao período do ciclo solar 24, foram obtidos gradientes ionosféricos que superam os limites do *CONUS Threat Model*, conforme mostra a Figura 50, bem como a Tabela 14, em que se destacam os 13 maiores valores de gradientes.

Figura 50 – Gradientes ionosféricos obtidos pelo *Low Latitude Threat Model*.



Fonte: Adaptado de USTDA (2015).

Tabela 14 – Maiores gradientes ionosféricos obtidos pelo *Low Latitude Threat Model*.

DOY-Ano	Par	Distância	Azimute	PRN	Hora [TU]	Gradiente	Elevação
060-2014	SJCU-SJSP	9,72 km	267,723°	03	1,067	850,7 mm/km	18,604°
060-2014	SJCE-SJCU	9,92 km	268,041°	03	1,071	779,6 mm/km	18,620°
322-2013	LSJK-SJCU	9,90 km	268,071°	22	2,008	732,2 mm/km	29,650°
314-2013	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	18	1,958	641,2 mm/km	55,060°
066-2014	RIOD-BAAF	10,49 km	228,890°	11	2,842	638,5 mm/km	32,058°
310-2013	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	18	1,192	596,4 mm/km	27,091°
055-2014	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	03	1,221	562,6 mm/km	27,332°
056-2014	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	27	1,092	553,3 mm/km	29,278°
319-2013	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	24	22,850	548,0 mm/km	46,381°
326-2013	SJSP-SJCU	9,72 km	267,723°	21	0,783	538,5 mm/km	52,873°
065-2014	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	11	2,329	510,2 mm/km	49,926°
365-2013	SAVO-SSA1	9,97 km	246,496°	21	23,860	501,2 mm/km	38,250°
056-2014	CEFT-FORT	12,22 km	252,212°	32	2,175	500,5 mm/km	29,987°

Fonte: USTDA (2015).

Algumas características e ressalvas destacadas pelos pesquisadores do projeto acerca das estimativas foram (USTDA, 2015):

- Devido ao curto período do projeto, dos recursos empenhados e da baixa atividade solar no ciclo 24, as estimativas dos parâmetros são limitadas;
- É necessária a utilização de dados do ciclo solar anterior e dos subsequentes para uma melhor estimativa dos parâmetros;
- As estimativas fornecem uma representação geral do risco ionosférico para o espaço aéreo brasileiro, entretanto, não é recomendado para análises regionais;
- Todos os gradientes ionosféricos máximos foram obtidos durante o período das 22h às 5h TU, horário de ocorrência das irregularidades ionosféricas;
- Nos dias em que ocorreram vários gradientes máximos para um mesmo satélite e par de estações, somente o maior valor foi armazenado;
- A maioria dos gradientes é proveniente de pares de estações paralelas ao equador magnético;
- Somente uma abordagem superficial para a determinação da velocidade e extensão da frente ionosférica foi realizada; e

- Os maiores valores de gradientes foram obtidos por pares cujas distâncias entre as estações são próximas a 10 km, o que não pode ser considerado como representativo para todo o território brasileiro.

Ainda segundo os pesquisadores, o processo de avaliação do modelo CONUS de risco ionosférico no Brasil foi semelhante ao realizado pela FAA nos Estados Unidos. Verificou-se, inicialmente, que o *CONUS Threat Model* é insuficiente para capturar todos os distúrbios ionosféricos sobre o território brasileiro, pois os maiores gradientes ocorreram após o pôr do Sol, e uma análise mostrou que as bolhas ionosféricas causaram a maioria dos gradientes observados, diferentemente da consideração de uma frente ionosférica. Também foram detectados que fortes cintilações ionosféricas ocorreram durante período de altos gradientes, o que indica uma possível correlação entre esses dois fenômenos (USTDA, 2015).

Assim, os mesmos pesquisadores concluíram que: um programa de monitoramento contínuo de gradientes ionosféricos deve ser desenvolvido, de modo que os parâmetros do modelo de risco permaneçam representativos das condições ionosféricas existentes na América do Sul; para a avaliação do desempenho do GBAS, os parâmetros do modelo devem ser revisados e verificados; e que há necessidade de estudos para verificar se existe correlação quantificável entre cintilação e gradientes ionosféricos (USTDA, 2015).

4.6.3 *Korean Threat Model*

A avaliação do modelo de risco ionosférico sul-coreano envolveu a análise de 22 dias durante os anos de 2000 a 2004. No total, 63 estações foram utilizadas para a obtenção dos gradientes, cujos valores foram inferiores aos limites do *CONUS Threat Model*, conforme apresentado pela Figura 46.

Determinações e análises a respeito da velocidade e extensão da frente e do valor máximo de atraso ionosférico não foram realizadas, pois, de acordo com Kim et al. (2015) e Lee et al. (2011b), esses parâmetros não influenciam, profundamente, na avaliação do GBAS. No entanto, destacam que os parâmetros citados são importantes para uma melhor compreensão do comportamento da ionosfera em condições anômalas.

4.6.4 German Threat Model

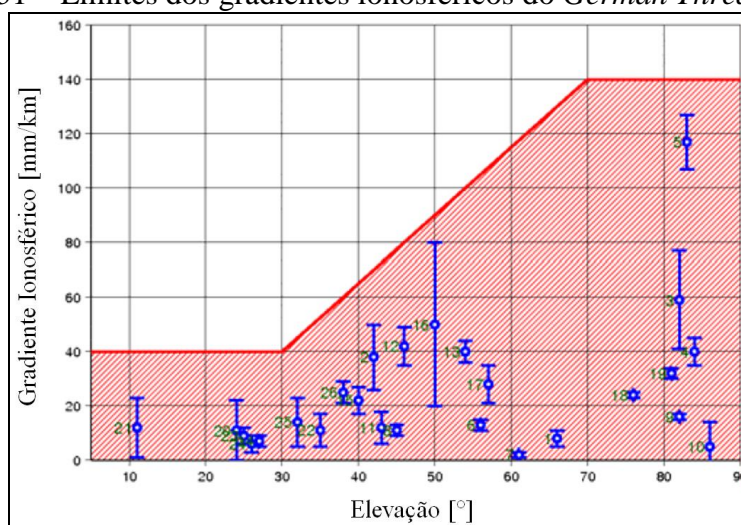
O *German Threat Model* foi desenvolvido utilizando dados do IGS, do EPN (*EUREF Permanent Network*), do GREF (*German Geodetic Reference Network*) e das estações SAPOS (*Satellite Positioning Service of the German State Survey*), situadas entre as longitudes 2° e 18° e as latitudes 45° e 58°. Dezesesseis períodos entre os anos de 1998 e 2008 foram analisados (MAYER et al., 2009). Os limites dos gradientes ionosféricos em função da elevação dos satélites são apresentados na Tabela 15 e na Figura 51.

Tabela 15 – Limites dos gradientes ionosféricos do *German Threat Model*.

Parâmetro	Limites do Parâmetro	
Gradiente Ionosférico Máximo	5° < Elevação ≤ 30°	40 mm/km
	30° < Elevação ≤ 70°	40 + 2,5*(Elevação – 30°) mm/km
	70° < Elevação ≤ 90°	140 mm/km

Fonte: Mayer et al. (2009).

Figura 51 – Limites dos gradientes ionosféricos do *German Threat Model*.



Fonte: Adaptado de Mayer et al. (2009).

Os gradientes obtidos no território alemão são bem menores que os do CONUS. Entretanto, foram determinadas velocidades de frentes maiores que 1.000 m/s, o que supera a velocidade máxima de 750 m/s do modelo norte-americano (MAYER et al., 2009).

5 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DE RISCO IONOSFÉRICO PARA GBAS NO BRASIL – MoR_Ion

Devido à importância e aos benefícios que o uso do GBAS pode proporcionar à navegação aérea brasileira, teve início a implementação do MoR_Ion (Modelo de Risco Ionoférico): sistema composto de um programa científico com o objetivo de investigar a usabilidade do modelo CONUS de risco ionosférico para GBAS no território brasileiro. Para tanto, se faz do uso de dados GPS, GLONASS e Galileo das estações das redes RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, IGS, LISN e ICEA, referentes aos anos de 2000 a 2016. O sistema permite também estimar parâmetros local-temporais para os principais aeroportos internacionais, pois a grande extensão territorial do Brasil proporciona diferentes condições ionosféricas em regiões distintas, além de estimar o parâmetro de integridade σ_{vig} em tempo real para cada satélite GPS e GLONASS disponível.

Dentre as principais diferenças, contribuições e características do MoR_Ion em relação ao *CONUS Threat Model* e aos demais “modelos” de risco avaliados, destacam-se:

- Utilização de 307 dias compreendidos entre os anos de 2000 e 2016, contemplando os ápices dos ciclos solares 23 e 24;
- Estimativa dos parâmetros do modelo utilizando, além dos sinais GPS (L1 e L2), dados GLONASS (L1 e L2) e Galileo (L1 e L5), bem como observáveis provenientes da portadora L5 do GPS;
- Estimativa dos parâmetros do modelo utilizando medidas de fase da portadora e de pseudodistância filtrada pela fase;
- Possibilidade de inserção de novas datas, além das 307 já selecionadas;
- Estimativa dos parâmetros do modelo para uma determinada região de interesse;
- Estimativa dos parâmetros do modelo para os aeroportos da INFRAERO e do DAESP (Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo);
- Estimativa dos parâmetros do modelo considerando a variação temporal, com referência às estações do ano (outono, inverno, primavera e verão);
- Validação semiautomática dos gradientes ionosféricos, a partir do uso de índices de irregularidades ionosféricas, de gradientes CMC,

abordagem diferenciada de comparação de gradientes de pares de estações vizinhas e validação manual;

- Determinação das direções de deslocamento das frentes ionosféricas para cada dia de dados processados;
- Geração de diferentes gráficos do modelo de risco, além da tradicional relação entre o gradiente ionosférico e a elevação dos satélites, tais como: gradiente e ano, gradiente e azimuth dos pares de estações, gradiente e direção da frente ionosférica, gradiente e distância do par de estações, gradiente e extensão da frente ionosférica, gradiente e latitude geomagnética do IPP, gradiente e longitude do IPP, gradiente e satélite, gradiente e tempo universal, e gradiente e velocidade da frente ionosférica; e
- Determinação do σ_{vig} em tempo real para cada satélite GPS (combinação L1/L2) e/ou GLONASS (combinação L1/L2) disponível, a partir de gradientes ionosféricos estimados com medidas de pseudodistância filtrada pela fase da portadora.

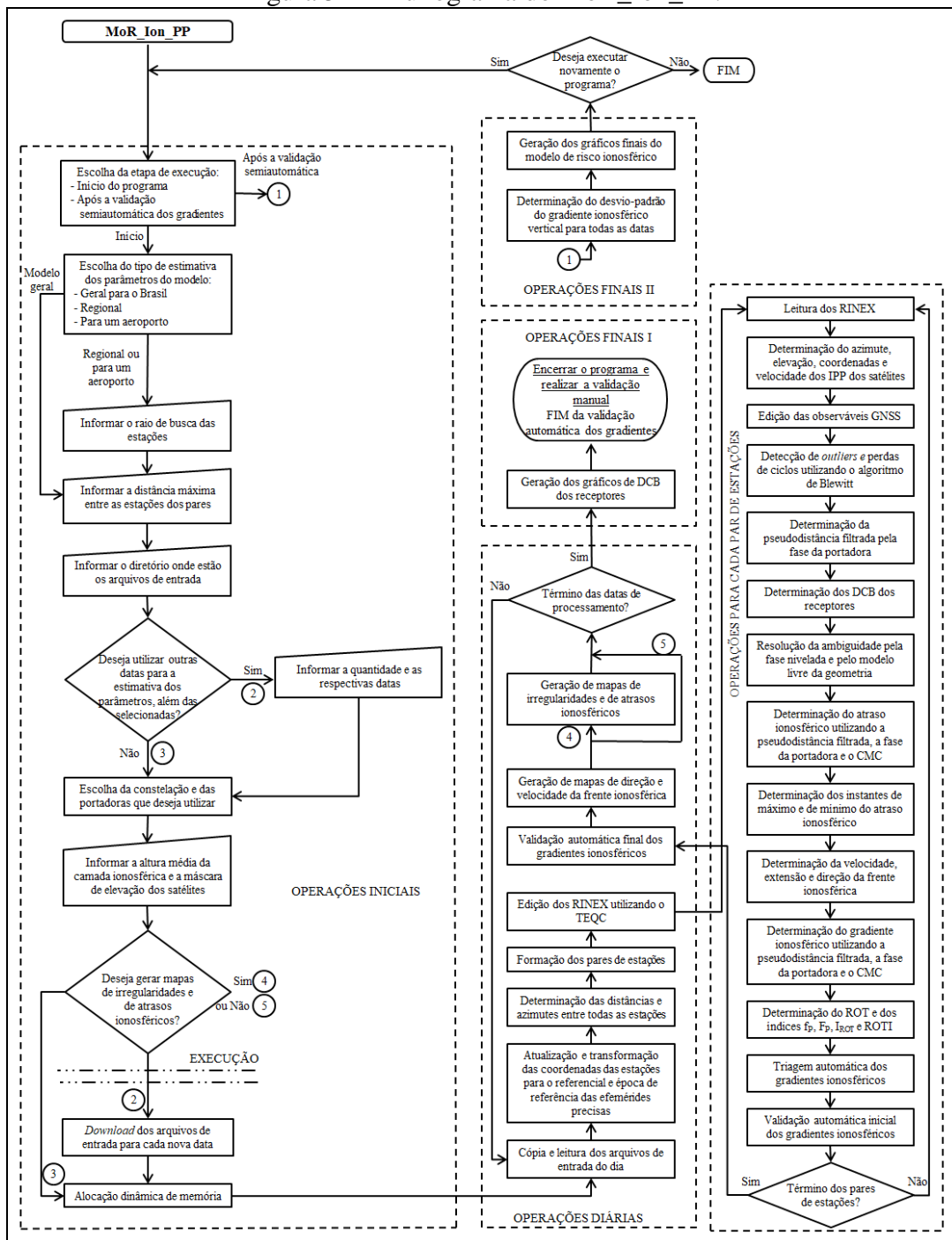
Com a avaliação do modelo CONUS de risco ionosférico para o Brasil, fica possível verificar se o modelo de GBAS atualmente comercializado pela Honeywell pode ser utilizado com segurança nas fases de aproximação e pouso de aeronaves nos principais aeroportos. No caso da possibilidade de não atender aos valores máximos dos parâmetros do *CONUS Threat Model* e nem aos requisitos de desempenho de navegação aérea estabelecidos pela ICAO, identificar quais áreas do território e em quais períodos do ano o GBAS provavelmente pode ser empregado, bem como informar quais as constelações de satélites e quais os sinais são os mais adequados para esse fim.

O desenvolvimento do programa é dividido em duas modalidades: pós-processado – estimativa dos parâmetros do modelo de risco ionosférico (MoR_Ion_PP); e em tempo real – estimativa do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical (MoR_Ion_TR). Na seção 5.1 é descrita a modalidade pós-processada, sendo que a implementação em tempo real é abordada na seção 5.2. O MoR_Ion foi desenvolvido em linguagem C e para sistema operacional Windows.

5.1 Modalidade – Estimativa dos Parâmetros do Modelo de Risco Ionosférico (Pós-Processado)

A modalidade MoR_Ion_PP, cujo fluxograma de execução é esquematizado na Figura 52, é dividida em cinco tipos de operações: iniciais, diárias, para cada par de estações, finais I e II. As principais características de cada operação são apresentadas na sequência, de acordo com a ordem de execução do programa.

Figura 52 – Fluxograma do MoR_Ion_PP.



A primeira operação consiste na informação, por parte do usuário, das seguintes configurações iniciais:

- Etapa de execução;
- Tipo de estimativa dos parâmetros do modelo de risco ionosférico;
- Distância Máxima (DM) entre as estações para formação dos pares;
- Diretório em que se encontram os arquivos de entrada;
- Opção de utilizar ou não outras datas para a estimativa dos parâmetros;
- Tipo de constelação de satélites e de combinação de portadoras;
- Altura média da camada ionosférica;
- Máscara de elevação dos satélites; e
- Opção de gerar ou não mapas de irregularidades ionosféricas e de atrasos ionosféricos.

Três tipos de estimativas dos parâmetros podem ser escolhidos: geral, regional ou para um determinado aeroporto. O geral considera todas as estações disponíveis em cada dia para a formação dos pares de estações, independentemente da localização das mesmas, permitindo assim uma estimativa generalizada dos parâmetros para o território brasileiro. No caso regional, como o próprio nome especifica, são estimados os valores para uma determinada região de interesse, delimitada a partir de um ponto central e um raio de abrangência (também denominado de raio de busca). Dessa forma, todas as estações situadas nessa região são utilizadas para a formação dos pares. Já para um determinado aeroporto são ofertadas duas redes: a INFRAERO (Figura 53), composta por 66 aeroportos, sendo alguns concessionados à iniciativa privada, e a DAESP (Figura 54), que contém 26 aeroportos.

A identificação de um aeroporto no Brasil é realizada pelo código IATA (*International Air Transport Association*). Entretanto, alguns aeroportos de pequeno porte não possuem esse código. Devido a isso, e também ao fato de que a maioria dos países não adotam oficialmente o código IATA, utiliza-se no MoR_Ion_PP o código ICAO, de abrangência mundial.

Figura 53 – Localização dos aeroportos da rede INFRAERO.

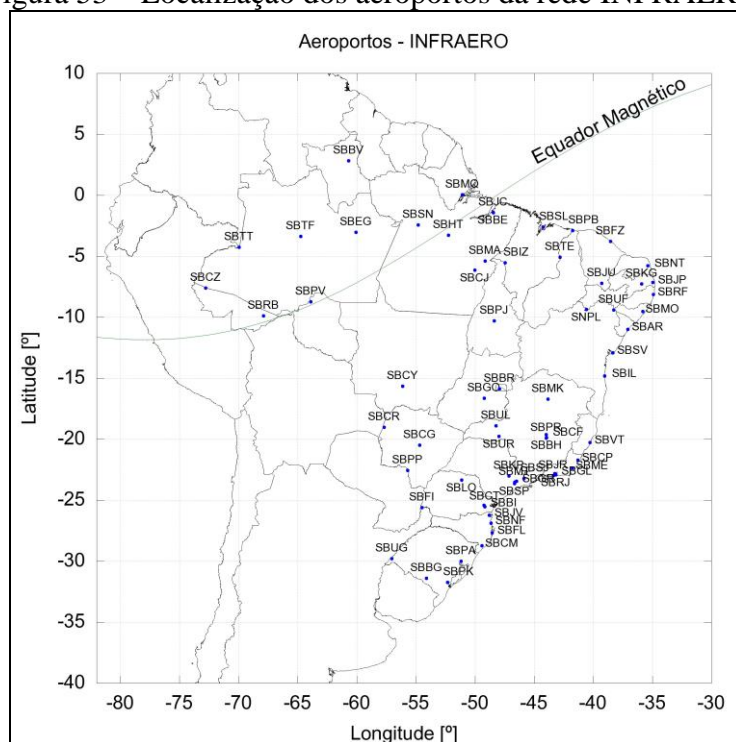
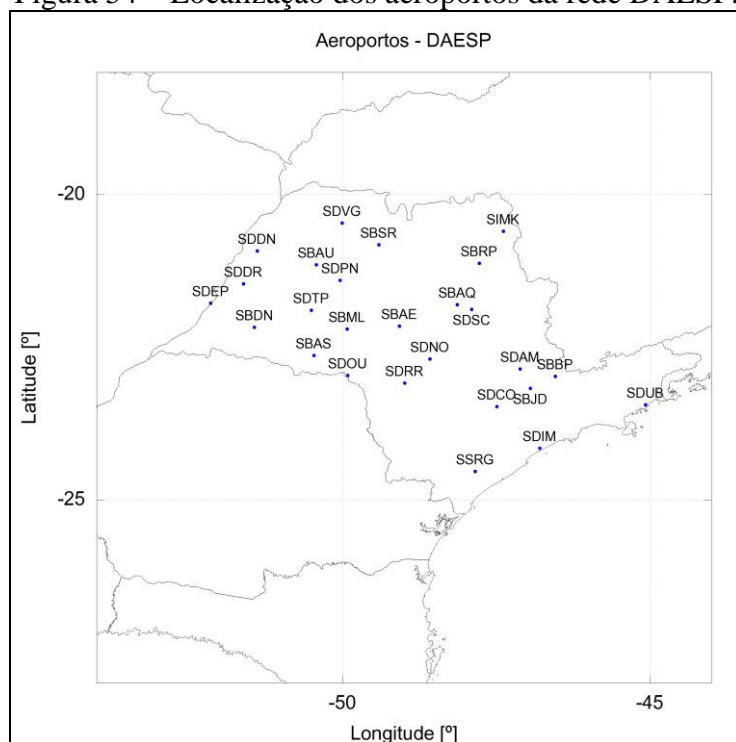


Figura 54 – Localização dos aeroportos da rede DAESP.



Tanto para a estimativa regional quanto para um aeroporto específico, um raio de busca das estações deve ser fornecido, sendo que, independentemente do tipo de estimativa selecionado, a DM para a formação dos pares de estações deve ser informada.

Os critérios para a seleção das datas, cuja atividade ionosférica provavelmente foi ativa (anômala), foram:

- Valor máximo do índice K_p do dia sendo maior ou próximo de 6,0, obtido em <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>; ou
- Valor mínimo do índice D_{st} do dia sendo menor ou próximo de -100 nT, obtido em <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>; ou
- Valor máximo do índice S4 (sem correção dos ruídos do ambiente) do dia sendo maior ou próximo de 1,0, obtido em <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/>>.

O uso dos índices K_p e D_{st} para a seleção dos dias, principalmente para o período de 2000 a 2010, é devido a inexistência de receptores geodésicos capazes de disponibilizar o índice de cintilação S4 naquele período.

Ressalta-se que, dentre as 307 datas, foram escolhidos também os dias 20 e 21 de junho (próximo ao solstício de inverno no hemisfério sul) para cada um dos anos do referido período, com intuito de abranger uma amostra caracterizada por baixa atividade ionosférica (nominal). O Apêndice A apresenta todas as datas selecionadas e os valores dos índices supracitados. A distribuição das datas de acordo com as estações do ano é apresentada na Tabela 16. Diferentemente da utilização das datas dos solstícios e equinócios para delimitar o início e o término de cada estação, foram consideradas como limite das estações a data média entre os solstícios e equinócios. Essa abordagem consiste em uma melhor representação das características de cada estação, se levar em conta que o regimento das mesmas é dado pela variação sazonal da declinação solar.

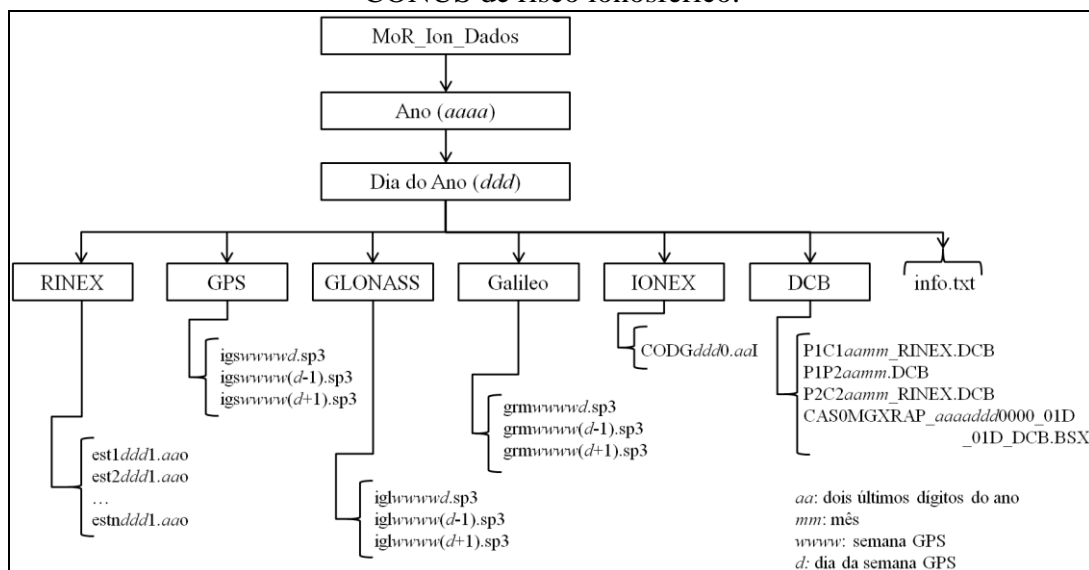
Tabela 16 – Distribuição das datas para a estimativa dos parâmetros do modelo de risco ionosférico de acordo com a abordagem diferenciada de delimitação das estações do ano.

Estação	Início	Término	Número de Datas
Outono	3 de fevereiro	5 de maio	63
Inverno	6 de maio	5 de agosto	81
Primavera	6 de agosto	4 de novembro	66
Verão	5 de novembro	2 de fevereiro	97
Total			307

Definidas as datas, foram obtidos todos os arquivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) de observações disponíveis das estações das redes RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, IGS, LISN e ICEA para cada dia, bem como as efemérides

precisas do IGS para o caso do GPS, do CDDIS (*Crustal Dynamics Data Information System*) para os satélites GLONASS e do MGEX (*Multi-GNSS Experiment*) para o Galileo, além dos arquivos IONEX e de DCB dos satélites provenientes do CODE. Ao final, os dados foram organizados em pastas, conforme esquematiza a Figura 55, e armazenados em mídia externa.

Figura 55 – Estrutura de organização dos dados GNSS utilizados na avaliação do modelo CONUS de risco ionosférico.



Por fim, são requisitadas mais cinco informações: 1) se deseja utilizar outras datas para a estimativa dos parâmetros, além das previamente selecionadas; 2) a constelação de satélites e a combinação de portadoras: GPS (L1/L2), GPS (L1/L5), GLONASS (L1/L2), Galileo (L1/L5) ou todas; 3) a altura média da camada ionosférica (geralmente 350 km); 4) a máscara de elevação dos satélites (em geral 10°); e 5) se deseja gerar mapas de geovisualização das irregularidades ionosféricas e dos atrasos ionosféricos.

Nas operações diárias, o cálculo do azimute e elevação dos satélites para uma determinada estação requer, além do conhecimento das coordenadas geodésicas cartesianas dos satélites, as coordenadas geodésicas curvilíneas e cartesianas da estação, todas associadas a um mesmo referencial geodésico e época de referência.

As coordenadas dos satélites são obtidas a partir das efemérides precisas, as quais podem estar associadas ao ITRF1997, 2000, 2005, 2008 ou 2014 (dependendo do ano) e época do dia da efeméride. Já as coordenadas das estações da RBMC e da rede GNSS-SP, vinculadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000), época de referência 2000,4, foram obtidas a partir dos descritivos fornecidos pelo IBGE. Em relação às coordenadas das estações das redes CIGALA/CALIBRA, LISN, ICEA e IGS, as

mesmas foram determinadas por meio de um posicionamento relativo estático, considerando como referência as estações RBMC.

Para compatibilizar as coordenadas das estações e dos satélites é realizada uma atualização e uma transformação das coordenadas das estações para a época do dia da efeméride e para o ITRF associado à mesma. Ressalta-se que as velocidades de todas as estações das redes ativas foram determinadas com o TREVel (PROL et al., 2014).

Devido às coordenadas dos satélites disponibilizadas pelas efemérides precisas possuírem uma resolução temporal de 15 minutos e as observáveis GNSS dos arquivos RINEX terem resolução da ordem de segundos, é realizado também uma interpolação das coordenadas dos satélites. Várias funções matemáticas permitem realizar essa tarefa, tais como: interpolação *Spline* Cúbica, polinômio de Chebyshev, polinômio de Lagrange, polinômio de Neville, polinômios trigonométricos, entre outras. No caso do MoR_Ion_PP a interpolação é baseada no polinômio de Lagrange, cuja formulação matemática é apresentada em Hofmann-Wellenhof et al. (2008). Está implementada o polinômio de Lagrange de 16ª ordem, pois, segundo Remondi (1991) apud Hofmann-Wellenhof et al. (2008) proporciona valores interpolados com precisão de ordem milimétrica.

Assim, as determinações do azimute e elevação dos satélites são realizadas utilizando as equações apresentadas em Hofmann-Wellenhof et al. (2008). Como resultados são gerados dois gráficos para cada estação: um *skyplot* e um gráfico que relaciona a elevação do satélite com o TU.

Atualizadas e transformadas as coordenadas, determinam-se as distâncias e os azimutes entre todas as estações do dia. Considerando, para fins de exemplificação, duas estações A e B, e devido à diferença entre o valor do azimute plano no sentido AB e no sentido BA ser de 180° , e com o intuito de obter um único valor de azimute para um dado alinhamento entre duas estações, é realizada uma transformação nos valores obtidos: subtrai-se 180° dos azimutes superiores a 180° . Assim, todos os azimutes passam a variar de 0° a 180° , contemplando dessa forma todas as possíveis direções entre dois alinhamentos e permitindo uma sistematização na classificação dos gradientes ionosféricos em relação ao azimute dos pares de estações a serem formados.

O processo de formação dos pares de estações é realizado de forma distinta para o caso geral em relação aos casos regional e para um aeroporto. Para o primeiro tipo, a composição dos pares está simplesmente associada na comparação das distâncias determinadas entre as estações com o valor da DM informada. Caso a distância seja menor que a DM, o par é considerado habilitado. Para as estimativas regionais e para um aeroporto,

realizam-se, primeiramente, a atualização e transformação das coordenadas do ponto central da região ou do aeroporto para a época do dia da efeméride e para o ITRF associado à mesma, de forma análoga as coordenadas das estações. De posse das coordenadas atualizadas e transformadas do ponto (região ou aeroporto) e das estações das redes ativas, determinam-se as distâncias entre o ponto e todas as estações. Assim, para a formação dos pares, além de verificar se as distâncias entre as estações são inferiores a DM, faz-se a checagem da distância entre cada estação do par com o raio de busca informado pelo usuário, sendo que a habilitação do par ocorre somente se ambas as distâncias forem menores que o raio. São gerados dois produtos como resultados: arquivo “pares_estacoes.txt”, contendo a data, DOY (*Day of Year*), sistema de referência, quantidade de pares formados, tamanho do raio de busca, tamanho da DM, informações gerais do aeroporto selecionado, coordenadas atualizadas e transformadas do ponto central ou do aeroporto, distância entre as estações de cada par, azimutes dos pares e as coordenadas atualizadas e transformadas das estações; e uma imagem “pares_estacoes.jpg”, que apresenta todos os pares formados.

Levando em consideração que uma das etapas para a realização da triagem automática consiste na eliminação dos gradientes devido a erros nos receptores, os quais ocorrem quando não há variação dos valores em relação ao tempo devido à proximidade das estações do par, descartam-se os pares cujas distâncias das estações são inferiores a 5 km já nessa operação.

Visando otimizar as leituras dos arquivos RINEX de observações, é realizada uma edição utilizando o TEQC (*Translation, Editing and Quality Checking*) da UNAVCO. As funções aplicadas são:

- Exclusão dos sinais provenientes dos sistemas GNSS que não sejam GPS, GLONASS e Galileo;
- Consideração de apenas das observáveis fase da portadora e pseudodistância nas portadoras L1, L2 e L5;
- Exclusão de comentários internos que pode haver entre as épocas de observações;
- Ordenação crescente dos satélites e, conseqüentemente, das observáveis GNSS para cada época; e
- Amostragem das observáveis em 30 segundos.

Para a interpolação dos valores de VTEC (*Vertical TEC*) dos arquivos IONEX e também para a geração de mapas de geovisualização, é necessária a determinação

das coordenadas dos IPP, que consistem nos pontos onde os sinais transmitidos pelos satélites interceptam a camada ionosférica em uma determinada altura média. As equações para o cálculo da latitude e longitude geográfica do IPP, utilizadas no programa, são apresentadas por El Gizawy (2003), onde se adota 6.371 km para o raio médio da Terra e o valor fornecido pelo usuário para a altura média da camada ionosférica. Já a determinação das velocidades dos IPP para cada satélite é realizada a partir da equação (48), sendo a diferença de tempo entre os instantes correspondente a 30 segundos.

Efetuada a leitura da fase da portadora e da pseudodistância e calculado o ângulo de elevação dos satélites, é realizada uma edição preliminar nos dados, antes da aplicação do algoritmo para detecção de *outliers* e perdas de ciclos. Verifica-se, para cada satélite e para cada época se as observáveis GNSS estão disponíveis, isto é, se há as medidas de fase e de pseudodistância para as portadoras L1 e L2 (GPS e GLONASS) e L1 e L5 (GPS e Galileo), bem como se o ângulo de elevação é maior que a máscara.

Designando por Φ_{L1} , Φ_{L2} e Φ_{L5} as fases nas portadoras L1, L2 e L5, por PD_{C1} , PD_{C2} e PD_{C5} as pseudodistâncias dos códigos C/A e L2C nas portadoras L1, L2 e L5 e por PD_{P1} e PD_{P2} as pseudodistâncias do código P, realiza-se a seguinte verificação e edição:

- Portadoras L1 e L2: é dada prevalência às observáveis Φ_{L1} , Φ_{L2} , PD_{P1} e PD_{P2} . Caso não haja medidas de PD_{P1} e PD_{P2} utilizam-se PD_{C1} e PD_{C2} com as correções de DCB_{P1C1} e DCB_{P2C2} , conforme as equações (63) e (64), com o intuito de tornar compatíveis as observáveis no código C/A com as do código P. Caso as quatro medidas não existam concomitantemente, o programa as exclui, pois é necessário que todas elas estejam disponíveis para a detecção de *outliers* e perdas de ciclos; e
- Portadoras L1 e L5: a prioridade é para as observações Φ_{L1} , Φ_{L5} , PD_{C1} e PD_{C5} . Na ausência de PD_{C1} e se PD_{P1} estiver disponível, utiliza-se a correção de DCB_{P1C1} de forma inversa. Por fim, não havendo as quatro medidas, as mesmas são eliminadas.

$$PD_{P1} = PD_{C1} + DCB_{P1C1} \cdot 10^{-9} \cdot c \quad (63)$$

$$PD_{P2} = PD_{C2} + DCB_{P2C2} \cdot 10^{-9} \cdot c \quad (64)$$

onde DCB_{P1C1} e DCB_{P2C2} são dadas em nanossegundos e c é a velocidade da luz no vácuo. A verificação e edição apresentadas anteriormente não se aplicam de forma integral para o caso da combinação CMC. A única diferença é que não há a necessidade de medidas de fase nas portadoras L2 e L5.

As principais causas das perdas de ciclos são as obstruções do sinal, o ruído devido ao multicaminho e o baixo ângulo de elevação do satélite, o que pode proporcionar uma diminuição da potência do sinal (SEEBER, 2003). A detecção, por sua vez, pode ser realizada utilizando as combinações de dupla e de tripla diferença. Entretanto, para as situações em que se deseja detectar as perdas referentes a uma única estação, outras estratégias devem ser adotadas. Blewitt (1990), por exemplo, apresenta uma abordagem baseada na combinação *wide-lane*, a qual envolve código e fase, sendo analisada para cada época se há a ocorrência ou não de perdas de ciclos. A formulação matemática do algoritmo, implementada no MoR_Ion_PP, é apresentada em Blewitt (1990) e também em Sharma et al. (2011). Além da detecção das perdas, o algoritmo também identifica *outliers*.

Utilizada para a determinação de atrasos ionosféricos e, principalmente, do DCB dos receptores, a pseudodistância filtrada pela fase da portadora pode ser estimada utilizando tanto a combinação L1/L2 quanto L1/L5. O algoritmo para as portadoras L1 e L2 é amplamente encontrado na literatura, como por exemplo, em Hatch (1982), Jin (1996) e Matsuoka e Camargo (2004). Para o caso das portadoras L1 e L5, basta, simplesmente, substituir o subscrito L2 por L5 nas equações apresentadas em Matsuoka e Camargo (2004), bem como considerar as precisões da pseudodistância e da fase para a portadora L5.

Com o intuito de estimar o DCB para qualquer estação receptora, pertencente ou não à rede IGS, Prol e Camargo (2014) desenvolveram uma técnica baseada em arquivos IONEX, a qual estima o DCB do receptor a partir da média aritmética da combinação linear livre da geometria. De acordo com os autores, o processamento é realizado com menos esforço computacional em comparação com a modelagem ionosférica, pois não necessita realizar a modelagem do TEC. Experimentos realizados na região brasileira mostram que os DCB estimados pela técnica apresentam concordância melhor que 0,47 ns com os DCB dos receptores disponibilizados nos arquivos IONEX do CODE. Ressalta-se que os baixos níveis de ruídos nas medidas de código, bem como a minimização dos efeitos de multicaminho e da camada ionosférica nos sinais são essenciais para a estimativa acurada dos DCB, o que pode ser obtido com o processo de filtragem do código pela fase (JIN, 1996), aplicação de uma elevada máscara de elevação e restrição do horário da combinação linear livre da geometria.

Dessa forma, o MoR_Ion_PP estima o DCB de cada receptor utilizando as medidas de pseudodistância filtrada pela fase da portadora, considerando uma máscara de elevação de 35° e uma janela entre 6h e 18h local (evitando horários de cintilação ionosférica), sendo para os satélites GPS utilizadas as combinações das portadoras L1/L2 e L1/L5, para o GLONASS L1/L2 e para o Galileo L1/L5. Um arquivo diário denominado “DCB_receptores.txt” é gerado pelo programa, o qual contém os valores de DCB dos receptores para todos os pares formados. A Tabela 17 apresenta, por exemplo, uma comparação dos valores de DCB estimados dos receptores das estações IGS disponíveis para o dia 6 de março de 2016 com os respectivos valores contidos no arquivo IONEX do CODE. O RMS dos DCB estimados pelo MoR_Ion_PP é inferior a 1 ns (≈ 30 cm) quando comparados com os valores do CODE.

Tabela 17 – Comparação dos DCB estimados dos receptores das estações IGS disponíveis para o dia 06/03/2016 com os respectivos valores contidos no arquivo IONEX do CODE.

Estação	Const.	DCB _{rP1P2}		Diferença
		MoR_Ion_PP	CODE	
BRAZ	G	44,110 ns	43,614 ns	0,496 ns
KOUR	G	5,802 ns	6,595 ns	-0,793 ns
	R	-4,978 ns	-4,945 ns	-0,033 ns
POVE	G	-14,267 ns	-14,387 ns	0,120 ns
	R	-11,300 ns	-10,676 ns	-0,624 ns
RECF	G	-15,208 ns	-16,292 ns	1,084 ns
	R	-9,775 ns	-10,091 ns	0,316 ns
RIOP	G	40,395 ns	40,815 ns	-0,420 ns
SALU	G	-13,909 ns	-13,669 ns	-0,240 ns
	R	-9,430 ns	-9,364 ns	-0,066 ns
SAVO	G	36,329 ns	35,196 ns	1,133 ns
	R	12,461 ns	12,294 ns	0,167 ns
UFPR	G	36,314 ns	35,515 ns	0,799 ns
	R	6,966 ns	6,327 ns	0,639 ns
RMS				0,607 ns

Métodos para a resolução da ambiguidade têm sido objeto de estudo de pesquisadores desde o início da década de 90. Dentre os métodos existentes destacam-se: *Least-Squares Ambiguity Search Technique* (LSAST), *Fast Ambiguity Resolution Approach* (FARA), *Modified Cholesky Decomposition*, *Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment* (LAMBDA), *Null Method*, *Fast Ambiguity Search Filter* (FASF), *Three Carrier Ambiguity Resolution* (TCAR), *Optimal Method for Estimating GPS Ambiguities* (OMEGA) e *Cascade Integer Resolution* (CIR). No entanto, um método simples para a estimativa da ambiguidade diferenciada entre as portadoras L1, L2 e L5, para cada arco de um satélite

(período de tempo em que não ocorrem perdas de ciclos), consiste na utilização da fase nivelada pela pseudodistância. A equação (65) apresenta o caso para as portadoras L1 e L2 (MANNUCCI et al., 1998):

$$N_{rL1}^s - N_{rL2}^s = (\lambda_{L1} \Phi_{rL1}^s - \lambda_{L2} \Phi_{rL2}^s) - (PD_{rL2}^s - PD_{rL1}^s) \quad (65)$$

Para a ambiguidade diferenciada entre L1 e L5 alteram-se somente as observáveis L2 pelas observáveis L5 na equação (65). Assim, estimados os valores de $N_{rL1}^s - N_{rL2}^s$ e $N_{rL1}^s - N_{rL5}^s$ para cada época de um arco de um satélite, determinam-se as médias dos valores, com o intuito de obter os valores de ambiguidades válidos para o arco (MANNUCCI et al., 1998). O processo se repete para todos os arcos presentes de cada satélite.

Na obtenção da ambiguidade apenas para a portadora L1 (N_{rL1}^s), necessária para a estimativa do atraso ionosférico CMC, pode-se utilizar como valor aproximado o resultado do modelo livre de geometria (*geometric-free model*) dado pela equação (66) para o caso da combinação L1/L2 (MONICO, 2008), e pela equação (67) para as portadoras L1 e L5:

$$N_{rL1}^s = \lambda_{L1} \Phi_{rL1}^s - 4,091457684 \cdot PD_{rL1}^s + 3,091457685 \cdot PD_{rL2}^s \quad (66)$$

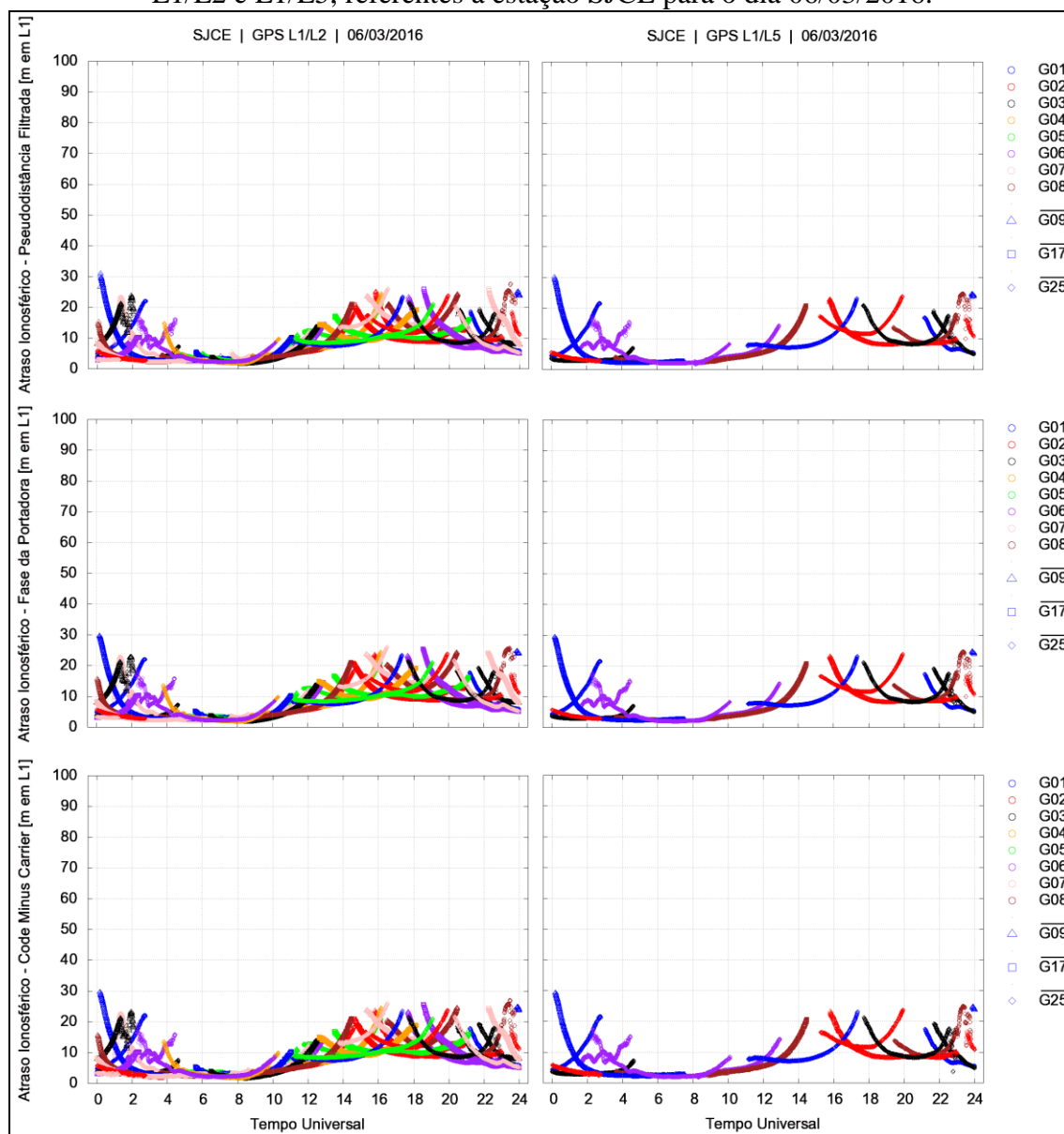
$$N_{rL1}^s = \lambda_{L1} \Phi_{rL1}^s - 3,521209677 \cdot PD_{rL1}^s + 2,521209676 \cdot PD_{rL5}^s \quad (67)$$

Determinados os DCB dos receptores, as ambiguidades diferenciadas, as ambiguidades somente para a portadora L1 e fazendo uso das observáveis fase da portadora, pseudodistância filtrada pela fase e medidas CMC, estimam-se três tipos de atrasos para os sinais dos satélites GPS, GLONASS e Galileo nas combinações L1/L2 e L1/L5 e apenas L1:

- Atraso ionosférico utilizando medidas de pseudodistância filtrada pela fase (I_{rPDF}^s), a partir da equação (58);
- Atraso ionosférico utilizando medidas de fase da portadora ($I_{r\Phi}^s$), a partir da equação (60); e
- Atraso ionosférico utilizando medidas CMC (I_{rCMC}^s), a partir da equação (61).

Para cada estação do par, são gerados gráficos de cada um dos tipos de atrasos, bem como arquivos contendo os valores numéricos. Exemplos de gráficos para os satélites GPS (combinações L1/L2 e L1/L5) são apresentados na Figura 56, referentes à estação SJCE para o caso do aeroporto internacional de São José dos Campos/SP (SBSJ) para o dia 6 de março de 2016, considerando um raio de busca de 50 km e uma DM de 40 km. Nos gráficos, bem como nas próximas figuras a serem apresentadas na tese, foi usado o seguinte esquema para a identificação dos satélites: PRNs de 1 a 8 utilizam o círculo, de 9 a 16 o triângulo, de 17 a 24 o quadrado e de 25 a 32 o losango, sendo empregada em cada um desses conjuntos a sequência de cores: azul, vermelho, preto, amarelo, verde, roxo, rosa e marrom.

Figura 56 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS em L1 obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes à estação SJCE para o dia 06/03/2016.



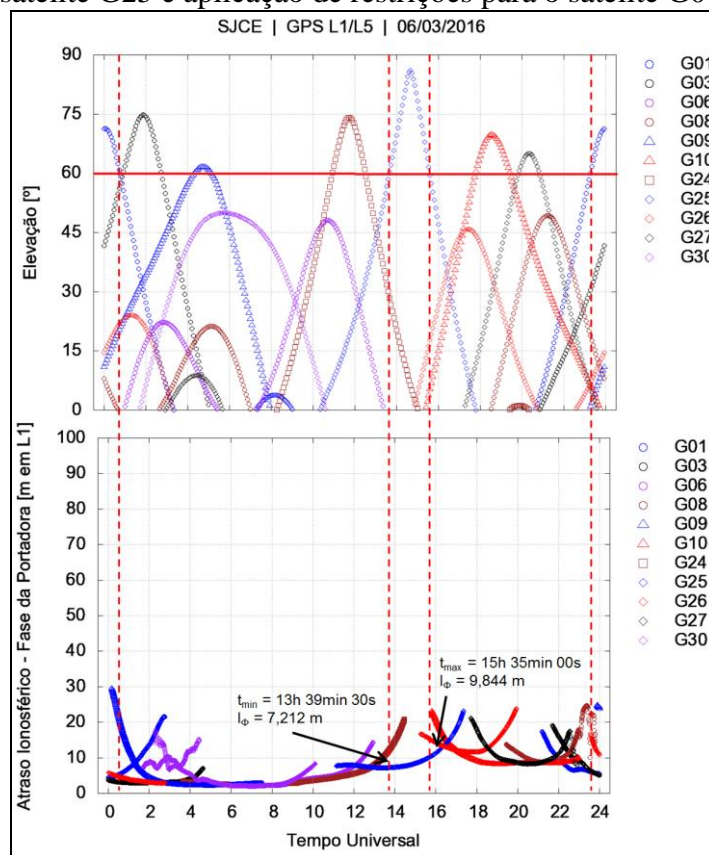
Os instantes de máximo e de mínimo são determinados, conforme o método apresentado em Srinivas et al. (2014), para cada satélite de cada constelação, utilizando os atrasos ionosféricos obtidos pela pseudodistância filtrada e pela fase da portadora. Como os períodos orbitais dos satélites GPS, GLONASS e Galileo são, respectivamente, 12h, 11h15 e 14h04 siderais, ocorrem situações em que há mais de um período completo de visibilidade de um mesmo satélite durante o dia. Essas situações, juntamente com o fato de alguns satélites apresentarem, provavelmente, instantes de máximo ou de mínimo antes do início do dia ou após o término do mesmo, e também devido ao fato dos maiores valores de atrasos estarem relacionados, na maioria dos casos, com as baixas elevações dos satélites, conduziram à aplicação de três restrições para a determinação dos instantes:

- Primeiramente, analisar apenas os atrasos ionosféricos relacionados a satélites cujas elevações sejam superiores a 60° ;
- Segundo, considerar apenas os satélites que apresentam período completo de visibilidade durante o dia em análise; e
- Terceiro, caso haja mais que um período, considerar o que possui os instantes cujo valor de atraso para determinar o instante máximo seja o maior.

A consideração de uma elevada máscara de elevação possibilita que sejam identificados os instantes que caracterizam o deslocamento da frente ionosférica de forma mais adequada, pois uma visão quase zenital da frente é obtida. A Figura 57 exemplifica como são realizadas as determinações dos instantes para o satélite G25 (combinação L1/L5), bem como, a aplicação das restrições para o satélite G01.

Determinados todos os instantes para as estações do par, estimam-se a velocidade (equação (46)), a extensão (equação (47)) e a direção (equação (49)) da frente ionosférica.

Figura 57 – Determinação dos instantes de máximo e de mínimo do atraso ionosférico para o satélite G25 e aplicação de restrições para o satélite G01.



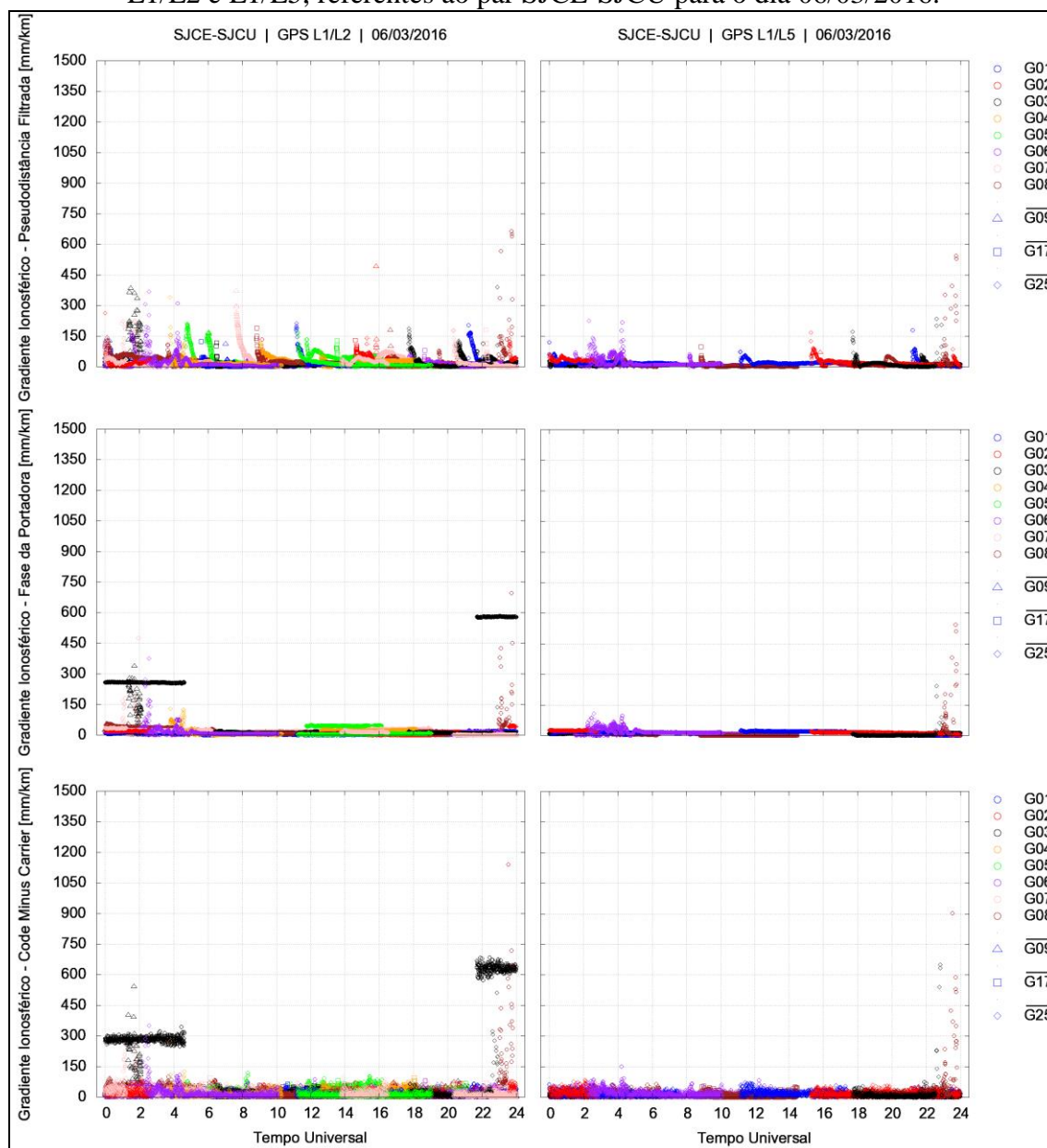
Conforme já explícito, o programa se baseia no *station-pair method* para a estimativa dos gradientes ionosféricos. A partir da equação (52), obtêm-se três tipos de gradientes:

- Gradientes ionosféricos utilizando valores de atrasos estimados com pseudodistância filtrada pela fase ($g^s_{I_{PDF}}$);
- Gradientes ionosféricos utilizando valores de atrasos estimados com fase da portadora ($g^s_{I_{\phi}}$); e
- Gradientes ionosféricos utilizando valores de atrasos estimados com medidas CMC ($g^s_{I_{CMC}}$).

Analogamente ao atraso ionosférico, são gerados gráficos de gradientes para cada par de estações, além de arquivos contendo os valores numéricos. A Figura 58 mostra, por exemplo, gradientes oriundos do par SJCE-SJCU, com distância de 9,921 km, para os satélites GPS (combinações L1/L2 e L1/L5) referentes ao dia 6 de março de 2016. Ressalta-se

que os gradientes da figura não são os definitivos para o par, pois se deve realizar ainda a triagem automática e as validações.

Figura 58 – Gradientes ionosféricos para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes ao par SJCE-SJCU para o dia 06/03/2016.



São calculados o ROT e índices de irregularidades da ionosfera concomitantemente com as estimativas dos gradientes, com o objetivo de auxiliar as etapas de triagem automática, validação automática inicial e validação manual. O processo de estimativa do ROT é o mesmo descrito por Pereira e Camargo (2017) e Pereira e Camargo (2016), sendo que, para os satélites GPS e Galileo, é utilizada a equação (10) e para os satélites GLONASS a equação (11), com Δt igual a 1 min em ambas as equações. Com o

intuito de aumentar o conjunto de valores de ROT, realiza-se uma janela deslizante durante o processo de cálculo da taxa de variação do TEC, sendo a janela de 1 minuto e o deslocamento de 30 segundos.

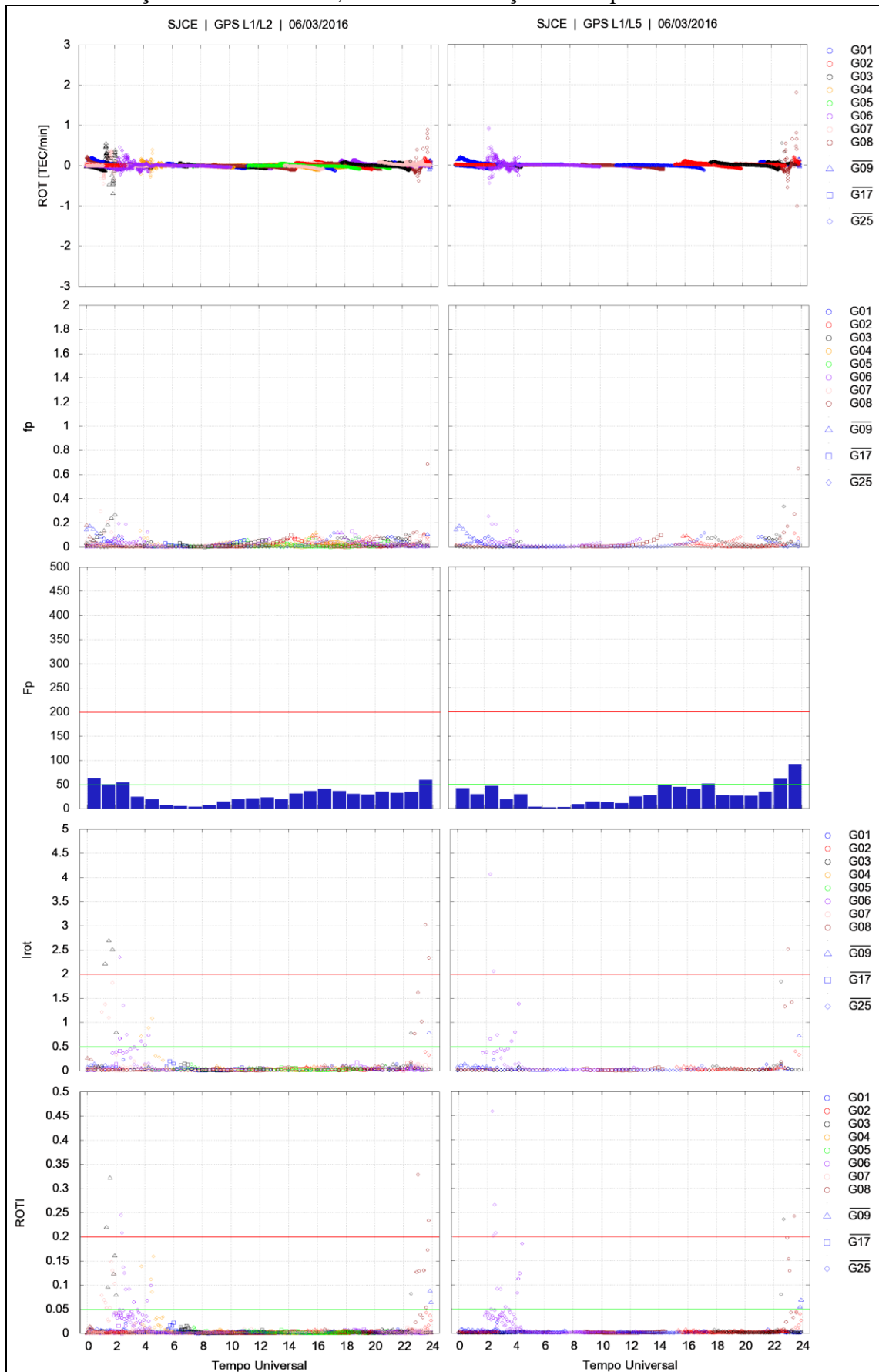
Com base nos valores de ROT, são estimados os índices de irregularidades f_p , F_p , I_{ROT} e $ROTI$ por meio das equações (12), (13), (14) e (15), respectivamente. À exceção do índice f_p , estimado a cada 15 minutos para cada IPP dos satélites de uma estação, os demais são representativos da localização da estação. Entretanto, para os índices I_{ROT} e $ROTI$, foi considerada a mesma distinção por satélites realizada para o índice f_p , pois as equações dos referidos índices permitem uma estimativa particularizada para os satélites. Exemplos de gráficos do GPS (combinações L1/L2 e L1/L5) da estação SJCE para o dia 6 de março de 2016 são apresentados na Figura 59.

Para a separação automática dos gradientes é considerado o limiar de 100 mm/km apresentado por Datta-Barua et al. (2010). Outra operação de triagem é excluir os gradientes cuja taxa de variação do atraso ionosférico é inferior a 10 mm/s, valor esse conservador em relação ao limiar de 15 mm/s adotado por Datta-Barua (2004). A justificativa para a adoção dessa taxa de variação é que irregularidades ionosféricas de pequena escala e magnitudes podem ocorrer no território brasileiro, conforme investigado por Pereira (2015). A taxa de variação do atraso ionosférico (ΔI) relaciona-se com o ROT a partir de:

$$ROT = \frac{f_{L1}^2 \cdot 10^{-16} \cdot \Delta I}{40,3} \quad (68)$$

sendo ΔI dado em m/s e, para o caso do GLONASS, f_{L1} calculado para cada satélite. Dessa forma, uma taxa de variação de atraso de 0,01 m/s é equivalente a um ROT de 0,061586803 para os satélites GPS ou Galileo e, por exemplo, um ROT de 0,06372721 para o satélite GLONASS R01. Portanto, para cada época de cada satélite, é analisado o valor de ROT, sendo que, caso o módulo seja inferior ao resultado da equação (68), os respectivos gradientes são eliminados.

Figura 59 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes à estação SJCE para o dia 06/03/2016.



Semelhantemente ao procedimento geral de validação dos gradientes, que consiste em examinar manualmente os gradientes triados com o objetivo de comprovar que os eventos observados são, de fato, eventos ionosféricos anômalos, propõe-se nessa pesquisa uma validação semiautomática. Para isso, são utilizados índices de irregularidades ionosféricas, gradientes CMC, abordagem diferenciada de comparação de gradientes de pares de estações vizinhas e análise manual.

A validação semiautomática é dividida em três passos: 1) validação automática inicial (denominada de “vi”), realizada em cada par de estações e que utiliza os índices F_P , I_{ROT} e $ROTI$ e os gradientes CMC; 2) validação automática final (“vf”), operação diária que analisa os gradientes iniciais de um par em relação aos pares vizinhos; e 3) validação manual, no qual são analisados, pelo usuário, os gradientes finais ou não validados que superam os limites do *CONUS Threat Model*.

Na validação automática inicial, os gradientes ionosféricos são considerados validados inicialmente, para um determinado instante, se uma das condições for satisfeita:

- O índice F_P de uma das estações do par for maior que 50; ou
- O índice I_{ROT} de uma das estações do par for superior a 0,5; ou
- O índice $ROTI$ de uma das estações do par for maior que 0,05.

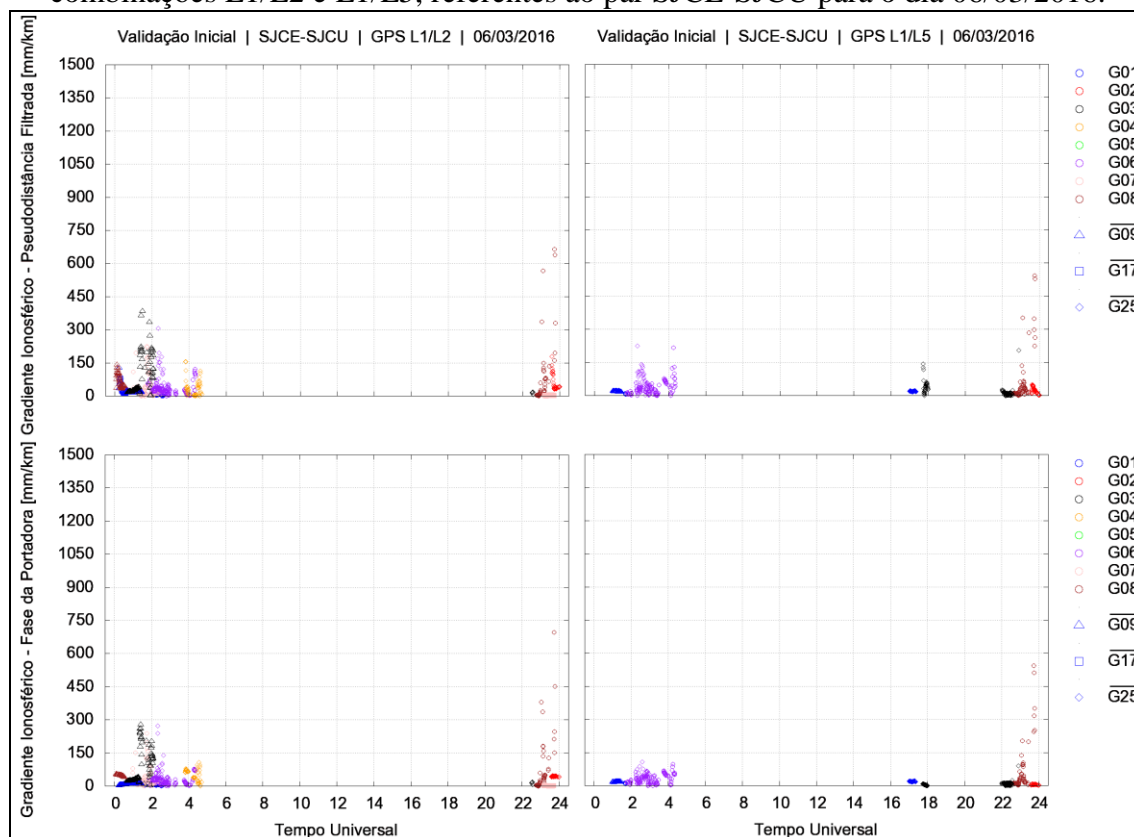
e se, adicionalmente, o respectivo gradiente CMC apresentar uma diferença máxima de até 50 mm/km (valor esse adotado a partir da análise e comparação de vários gradientes de dados de dupla frequência e de portadora L1).

A justificativa para o uso dos limiares supracitados é que, para a ocorrência de valores de gradientes ionosféricos moderados ou altos (acima de 100 mm/km) é necessária a ocorrência de, no mínimo, níveis moderados de irregularidades ionosféricas.

Como a validação inicial padrão consiste apenas na comparação dos gradientes provenientes de dados de dupla frequência com os gradientes estimados apenas com a portadora L1, o emprego de índices de irregularidades visa basicamente assegurar que os gradientes obtidos são, em um primeiro instante, devidos a eventos ionosféricos anômalos.

Os resultados para cada par de estações, após a execução da triagem automática e da validação automática inicial, são apresentados em forma de gráficos e arquivos, semelhante à etapa da estimativa dos gradientes ionosféricos. A Figura 60 apresenta, por exemplo, os gradientes de pseudodistância filtrada e de fase da portadora para os satélites GPS (combinações L1/L2 e L1/L5) do par SJCE-SJCU, dia 06/03/2016, que foram validados inicialmente.

Figura 60 – Gradientes ionosféricos iniciais para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes ao par SJCE-SJCU para o dia 06/03/2016.

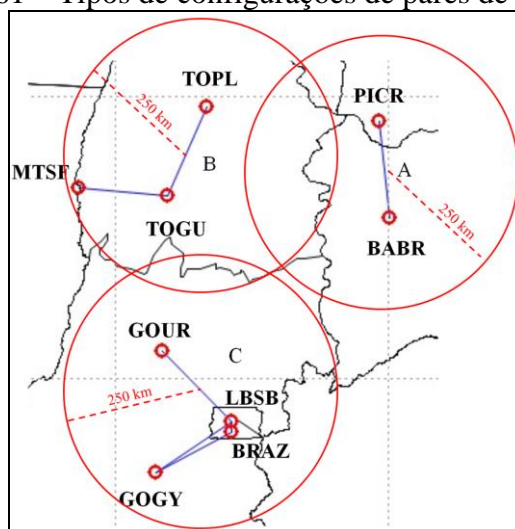


Observa-se que, comparando os gráficos das Figuras 58 e 59 com os da Figura 60, apenas os gradientes de alguns satélites são oriundos de fortes perturbações na densidade de elétrons da camada ionosférica. Entretanto, resta verificar ainda se os mesmos não são provocados por falhas ou erros dos receptores das estações.

O método de comparação dos gradientes ionosféricos iniciais de um par de estações com os pares vizinhos, aplicado no programa, consiste, basicamente, em comparar, época por época, satélite por satélite, os gradientes iniciais dos pares que estejam em um raio de 250 km em relação ao par em análise. Três tipos de configurações de pares podem ocorrer, conforme mostra a Figura 61:

- **Tipo A:** par de estações que não possui outros pares próximos em um raio de 250 km (exemplo: par BABR-PICR);
- **Tipo B:** par de estações que possui apenas um par próximo em um raio de 250 km (exemplo: par TOPL-TOGU e TOGU-MTSF); ou
- **Tipo C:** par de estações que possui mais que um par próximo em um raio de 250 km (exemplo: par LBSB-GOUR com os pares LBSB-BRAZ, LBSB-GOGY e BRAZ-GOGY).

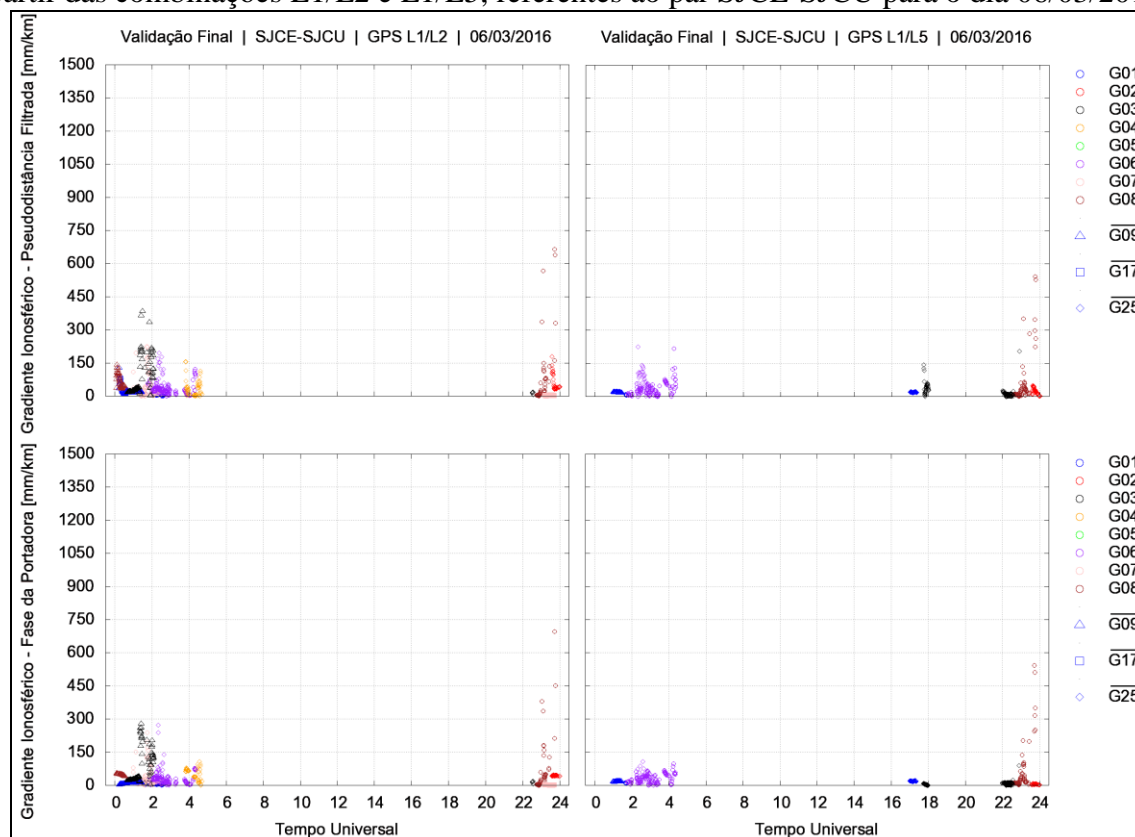
Figura 61 – Tipos de configurações de pares de estações.



Caso o par seja tipo A, não é possível realizar a validação automática final, sendo assim os gradientes classificados como não validados e pendentes de uma validação manual. Na situação B os gradientes iniciais dos pares são comparados e, caso a discrepância para uma determinada época seja superior a 200 mm/km (valor adotado depois de analisar diversos gradientes de pares com distâncias variando até 500 km), os gradientes de ambos os pares são excluídos. Caso contrário, são considerados como finais. O gradiente do par em questão também é classificado como não validado se o gradiente inicial do par vizinho estiver ausente para a mesma época e satélite, situação essa análoga à do tipo A. Por fim, para o tipo C, os gradientes iniciais do par em análise são confrontados com os gradientes iniciais dos pares vizinhos. Somente são classificados como finais se a maioria dos gradientes dos pares vizinhos apresentar diferenças inferiores a 200 mm/km em relação aos gradientes do par em questão. Se a maioria apresentar discrepância superior, os gradientes iniciais do par são excluídos. Ausentes os gradientes dos pares vizinhos para a época e o satélite, o gradiente do par em questão é classificado como não validado. O valor de 200 mm/km é, na realidade, um limiar para identificar falhas ou erros que acometem os receptores na circunvizinhança.

Retornando ao exemplo do par SJCE-SJCU, tem-se que há mais três pares de estações vizinhas: LSJK-SJCU, SJCU-SJSP e ICEA-SJCU. Dessa forma, comparando os gradientes iniciais do par SJCE-SJCU com os dos pares supracitados, obtêm-se os gradientes finais e os não validados do par em questão, os quais são apresentados em forma de gráficos (Figura 62) e de arquivos numéricos.

Figura 62 – Gradientes ionosféricos finais e não validados para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes ao par SJCE-SJCU para o dia 06/03/2016.



Dependendo da escolha do tipo de constelação de satélites e da combinação de portadoras, são gerados, ao término da validação automática final, arquivos diários contendo todos os dados utilizados e estimados pelo programa. Cada arquivo corresponde a um determinado dia de processamento, tipo de gradiente ($g^s_{I_{PDF}}$ ou $g^s_{I_{\phi}}$), constelação de satélites e combinação de portadoras, ao passo que cada linha do arquivo remete a um determinado par de estações, época e satélite. Ao todo são 16 dados apresentados na seguinte ordem: 1) identificador se o gradiente ionosférico é não validado (número 1) ou final (número 2); 2) data de processamento; 3) ano da data de processamento; 4) DOY da data de processamento; 5) TU em horas decimais; 6) número identificador do par de estações; 7) sigla da primeira estação que compõem o par; 8) sigla da segunda estação que compõem o par; 9) distância entre as estações do par em quilômetros; 10) azimute do par de estações em graus decimais; 11) época, sendo 0 referente às 0h e 2879 às 23h 59min 30s TU; 12) PRN do satélite; 13) gradiente ionosférico inclinado em mm/km; 14) elevação média do satélite em graus decimais; 15) latitude geomagnética do IPP do satélite em graus decimais; e 16) longitude do IPP do satélite em graus decimais.

Baseado nesses arquivos diários, o usuário realiza a validação manual dos gradientes. A Figura 63 apresenta, por exemplo, as 20 linhas iniciais do arquivo “2016_066_gIf_vf_GPS_L1L2.txt”, o qual se refere aos gradientes finais e não validados estimados com medidas de fase para a combinação L1/L2, provenientes dos pares do caso do aeroporto SBSJ para o dia 6 de março de 2016.

Figura 63 – Trecho inicial do arquivo “2016_066_gIf_vf_GPS_L1L2.txt” referente ao caso do aeroporto SBSJ.

2	06/03/2016	2016	066	23.725000	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	2847	08	0726.13347	11.06642	-13.33857325	-49.44603028
2	06/03/2016	2016	066	23.725000	0002	SJCE	SJCU	00000009.921	088.02209881	2847	08	0697.02208	11.06513	-13.33789859	-49.44200008
2	06/03/2016	2016	066	23.725000	0001	LSJK	SJCU	00000009.924	088.05113855	2847	08	0516.37371	11.06511	-13.33790846	-49.44199082
1	06/03/2016	2016	066	23.775000	0002	SJCE	SJCU	00000009.921	088.02209881	2853	08	0450.73937	10.29094	-12.90173110	-49.39511809
2	06/03/2016	2016	066	01.816667	0001	LSJK	SJCU	00000009.924	088.05113855	0218	11	0405.40699	14.66252	-14.45010354	-47.12873819
1	06/03/2016	2016	066	23.025000	0002	SJCE	SJCU	00000009.921	088.02209881	2763	08	0380.58978	23.33391	-18.03936894	-49.43372688
2	06/03/2016	2016	066	23.091667	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	2771	08	0374.35521	22.07696	-17.69701671	-49.46965084
2	06/03/2016	2016	066	01.433333	0003	SJCU	SJSP	00000009.718	087.75982067	0172	11	0360.23916	21.92838	-16.90564969	-47.60358425
2	06/03/2016	2016	066	23.091667	0002	SJCE	SJCU	00000009.921	088.02209881	2771	08	0336.98877	22.07460	-17.69648814	-49.46550896
1	06/03/2016	2016	066	23.591667	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	2831	08	0335.13752	13.20806	-14.43602957	-49.52741925
2	06/03/2016	2016	066	01.416667	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0170	11	0327.79809	22.26248	-16.99665836	-47.61944726
2	06/03/2016	2016	066	02.025000	0001	LSJK	SJCU	00000009.924	088.05113855	0243	11	0321.24170	11.08781	-12.79316883	-46.65701396
2	06/03/2016	2016	066	01.425000	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0171	11	0316.30455	22.09550	-16.95155835	-47.61330587
2	06/03/2016	2016	066	02.033333	0001	LSJK	SJCU	00000009.924	088.05113855	0244	11	0307.82976	10.95088	-12.72225315	-46.63397136
2	06/03/2016	2016	066	01.375000	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0165	11	0295.44809	23.10225	-17.21757034	-47.64823328
2	06/03/2016	2016	066	01.383333	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0166	11	0285.98334	22.93366	-17.17399275	-47.64272548
2	06/03/2016	2016	066	01.441667	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0173	11	0280.45783	21.76254	-16.86042422	-47.60062238
2	06/03/2016	2016	066	01.416667	0002	SJCE	SJCU	00000009.921	088.02209881	0170	11	0279.07054	22.26151	-16.99626821	-47.61514536
2	06/03/2016	2016	066	01.816667	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0218	11	0278.84231	14.66290	-14.45043733	-47.13298230
2	06/03/2016	2016	066	01.391667	0000	ICEA	SJCU	00000008.907	088.22672955	0167	11	0276.33860	22.76538	-17.13011484	-47.63709497

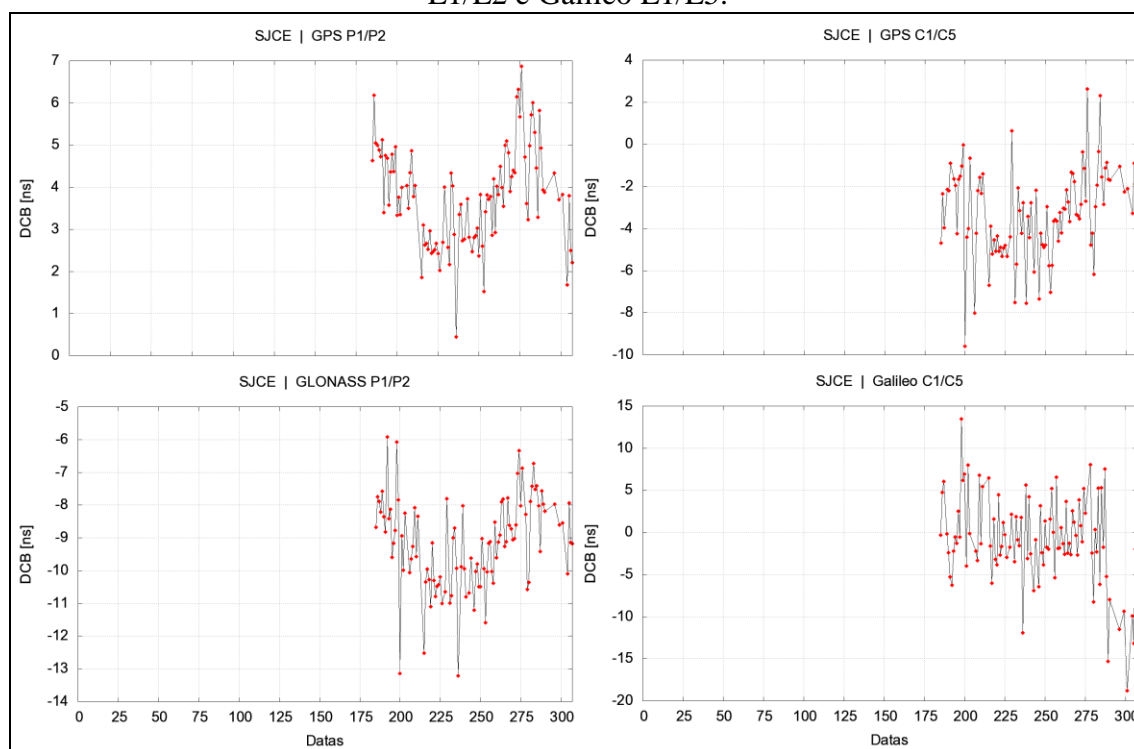
Determinada a velocidade da frente ionosférica e sua direção de deslocamento a partir dos dados de cada par de estações é possível gerar mapas de vetores que indicam o seu comportamento. Nos mapas são traçados vetores para cada par formado, sendo o tamanho do vetor (em vermelho) em concordância com a escala da velocidade e a direção definida pela extremidade do vetor, sendo o sentido do deslocamento indicado pelo ponto azul. Exemplos de mapas podem ser visualizados na Figura 103 (página 198) da seção 6.2. Tais mapas mostram que a frente ionosférica se desloca sobre o território brasileiro de oeste para leste paralelamente ao equador magnético.

Os mapas de geovisualização são gerados em função da opção escolhida pelo usuário. Para os índices de irregularidades são gerados mapas de acordo com as resoluções temporais dos mesmos. Já para os atrasos ionosféricos, que são estimados a cada 30 segundos, são produzidos mapas com intervalos de 10 minutos. Os mapas são produzidos utilizando satélites GPS, GLONASS ou Galileo para as combinações de portadoras L1/L2 ou L1/L5. Independentemente do tipo de estimativa escolhido são utilizadas todas as estações disponíveis em cada dia para a geração dos mapas, sendo os mesmos disponibilizados apenas para o intervalo entre 18h e 6h TU. Para os atrasos ionosféricos são elaborados dois tipos de mapas: um utilizando a observável fase da portadora e outro a pseudodistância filtrada pela

fase. Em relação ao método de interpolação aplicado aos valores utiliza-se a krigagem ordinária (PEREIRA et al., 2018; KIEFT et al., 2014).

Após o término das operações diárias tem-se a geração dos gráficos de DCB para cada um dos receptores dos pares de estações formados. Tais gráficos consistem, basicamente, na visualização dos DCB estimados ao longo das 307 datas de processamento utilizadas no programa, permitindo que o usuário possa realizar uma análise temporal e verificar se algum valor não condiz com a tendência apresentada (salvo quando há trocas de receptor e/ou antena). Os gráficos podem também ser empregados como informações auxiliares na etapa de validação manual dos gradientes. Exemplos de gráficos para as combinações entre as portadoras L1 e L2 dos sinais GPS e GLONASS e entre as portadoras L1 e L5 dos sinais GPS e Galileo para o receptor da estação SJCE são mostrados na Figura 64. Destaca-se que, antes da data de número 185 (correspondente a 1 de junho de 2013), não haviam dados GNSS disponíveis da estação SJCE.

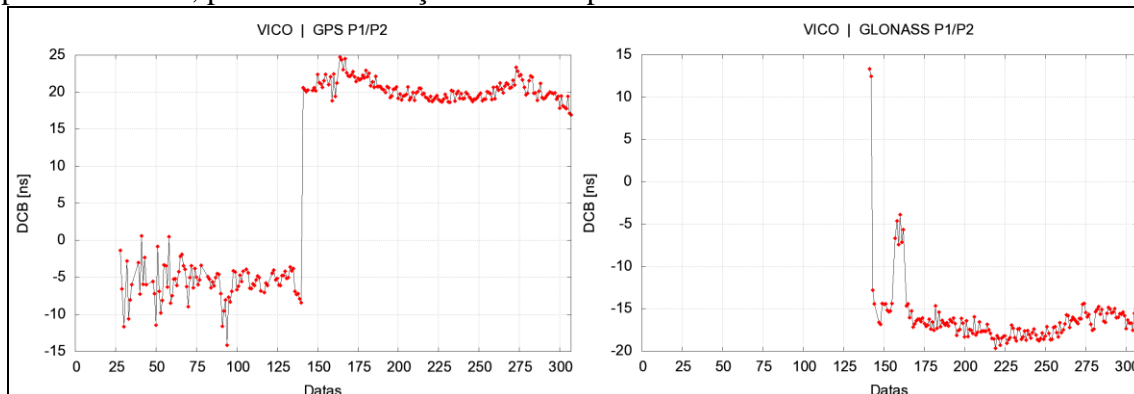
Figura 64 – Gráficos de DCB do receptor da estação SJCE em função das datas de processamento, para as combinações entre as portadoras GPS L1/L2 e L1/L5, GLONASS L1/L2 e Galileo L1/L5.



Uma característica típica dos DCB que pode ocorrer é um salto repentino dos valores, fato este que ocorre quando há troca de antena e/ou receptor na estação. Para

ilustrar tal característica são apresentados na Figura 65 gráficos de DCB para a combinação entre as portadoras L1 e L2 dos sinais GPS e GLONASS para o receptor da estação VICO.

Figura 65 – Gráficos de DCB do receptor da estação VICO em função das datas de processamento, para as combinações entre as portadoras GPS L1/L2 e GLONASS L1/L2.



Nota-se que, entre as datas de número 140 (15 de dezembro de 2006) e 141 (20 de junho de 2007) ocorrem saltos de DCB devido às trocas do receptor e da antena da estação no dia 4 de abril de 2007, de um TRIMBLE 4000SSI com DORNE MARGOLIN T para um TRIMBLE NETR5 com ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2. Observa-se também uma variação entre as datas 150 e 175, período esse em que foi instalado, temporariamente, um receptor LEICA GRX1200+ GNSS com antena LEIAX1203+ GNSS (IBGE, 2012).

De posse dos arquivos diários, os quais contêm todos os resultados dos dados processados e ordenados decrescentemente em função dos gradientes ionosféricos, é realizada a validação manual. Foram estabelecidos quatro critérios com o intuito de analisar se os gradientes não validados são de fato devidos à eventos ionosféricos anômalos e não oriundos de erros de processamento ou nos receptores:

- Critério 1: considerar apenas os gradientes cujos valores são superiores aos limites do *CONUS Threat Model* (Tabela 13);
- Critério 2: a partir dos gradientes do critério 1, considerar apenas os que ocorrem entre 21h e 9h TU, período caracterizado pelo efeito de diversos distúrbios ionosféricos;
- Critério 3: a partir dos gradientes remanescentes do critério 2, considerar apenas os gradientes cujas distâncias entre as estações dos pares sejam inferiores a 250 km, pois elevados gradientes nas

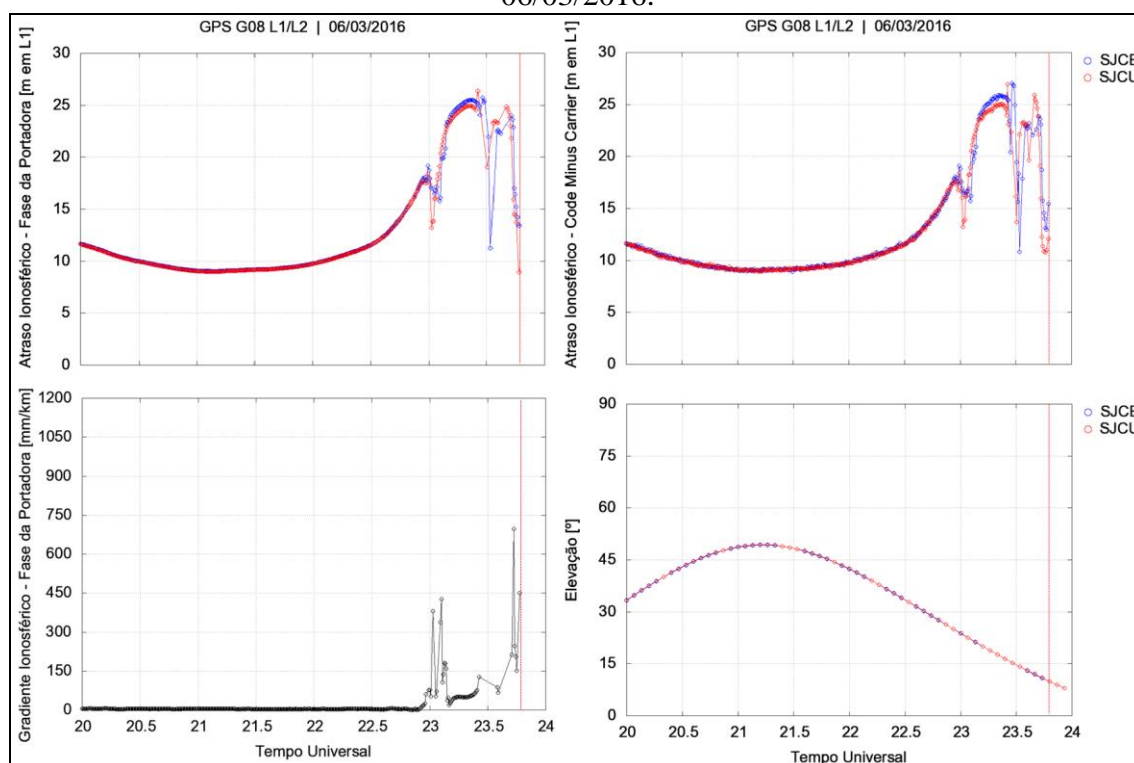
demais situações são mais susceptíveis a erros de processamento ou nos receptores; e

- Critério 4: a partir dos gradientes restantes do critério 3, verificar se o gradiente é final (identificador número 2) ou não validado (número 1), sendo mantidos os gradientes finais e analisados manualmente os não validados.

A validação manual, propriamente dita, consiste na análise temporal e quantitativa dos atrasos ionosféricos das estações do par que proporcionam os gradientes ionosféricos e na comparação entre os gradientes determinados com medidas de dupla frequência com os estimados apenas na portadora L1. Informações auxiliares também são utilizadas para fundamentar as análises, como a elevação dos satélites, *skyplots*, índices de irregularidades e mapas de atrasos e de irregularidades ionosféricas.

Visando apresentar, passo a passo, a validação manual realizada para cada um dos arquivos diários, consideram-se, como exemplo, os gradientes finais e não validados estimados com medidas de fase nas portadoras L1 e L2 dos satélites GPS, provenientes dos pares do aeroporto SBSJ do dia 6 de março de 2016 (Figura 63). Os três primeiros gradientes (726,133 mm/km, 697,022 mm/km e 516,374 mm/km) atendem aos critérios 1, 2, 3 e, como são classificados como finais, os mesmos são mantidos na estimativa dos parâmetros do modelo de risco. Já o quarto gradiente, de valor 450,740 mm/km, referente ao par SJCE-SJCU (distância de 9,921 km e azimute $88^{\circ} 01' 19,56''$), ocorrido às 23h 46min 30s TU, para o satélite G08 de elevação $10^{\circ} 17' 27,38''$, também atende os três primeiros critérios. No entanto, foi classificado como não validado (devido a impossibilidade de se realizar a comparação com pares vizinhos). Assim, os atrasos das estações SJCE e SJCU (fase e CMC) e os respectivos gradientes para o período das 20h às 24h TU, bem como as elevações do satélite G08, são apresentadas na Figura 66. Destaca-se que a linha vertical vermelha se refere ao instante de ocorrência do gradiente em análise.

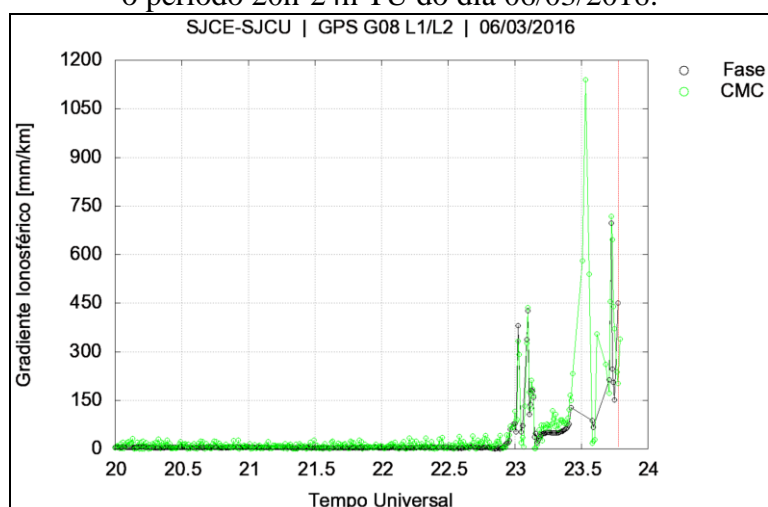
Figura 66 – Atrasos ionosféricos, gradientes ionosféricos e elevação do satélite G08 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.



Observa-se pela Figura 66 que, enquanto a estação SJCU apresenta uma queda rápida do atraso ionosférico do instante 23h 46min (13,726 m) para o instante 23h 46min 30s TU (8,955 m), na estação SJCE o atraso oscila poucos centímetros (de 13,554 para 13,426 m) no mesmo período, proporcionando dessa maneira um gradiente de 450,740 mm/km às 23h 46min 30s TU. Outro fato interessante de se notar é a concordância dos atrasos CMC das duas estações durante grande parte do tempo, principalmente para o instante em análise, sendo que a partir das 23h TU os atrasos da SJCE tendem a serem maiores que os da SJCU, o que pode explicar a ocorrência de elevados gradientes. Verifica-se também pela Figura 66 que, à medida que a elevação do satélite diminui, há uma maior variabilidade dos atrasos ionosféricos.

Ao se comparar os gradientes de dupla frequência com os gradientes CMC na Figura 67 conclui-se que tais estimativas apresentam um alto grau de concordância, em relação aos padrões dos valores em função do tempo, da magnitude e das épocas dos gradientes ionosféricos máximos, em especial para a ocorrência do gradiente 450,740 mm/km (linha vermelha), bem como durante o período em que há falta de dados L2, podendo levar à conclusão de que o evento em análise é devido a uma anomalia ionosférica.

Figura 67 – Gradientes ionosféricos do satélite G08 obtidos com medidas de fase a partir da combinação L1/L2 e com medidas CMC na portadora L1, referentes ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.



Análises auxiliares para a comprovação do gradiente podem ser realizadas utilizando o índice de cintilação ionosférica S4, proveniente da ferramenta *web* ISMR Query Tool (VANI et al., 2017), índices de irregularidades ionosféricas e mapas de geovisualização, conforme mostram as Figuras 68 a 71.

Figura 68 – ROT e índices f_p , I_{ROT} e ROTI do satélite G08 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.

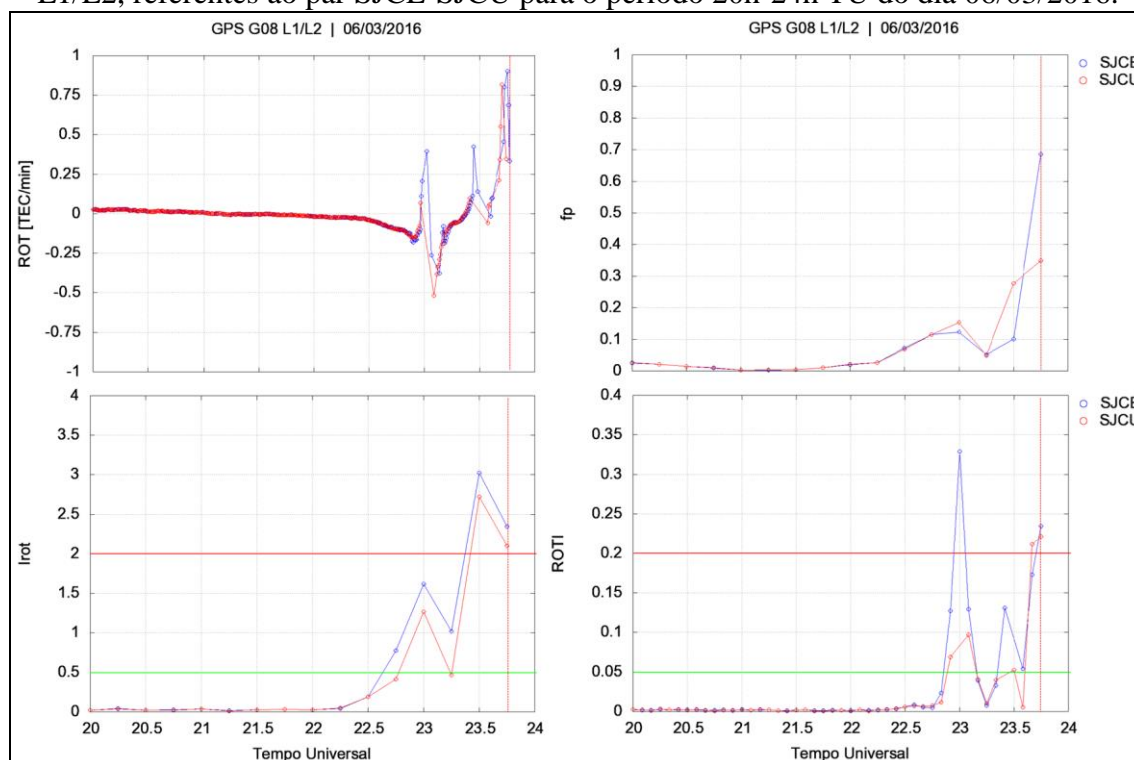
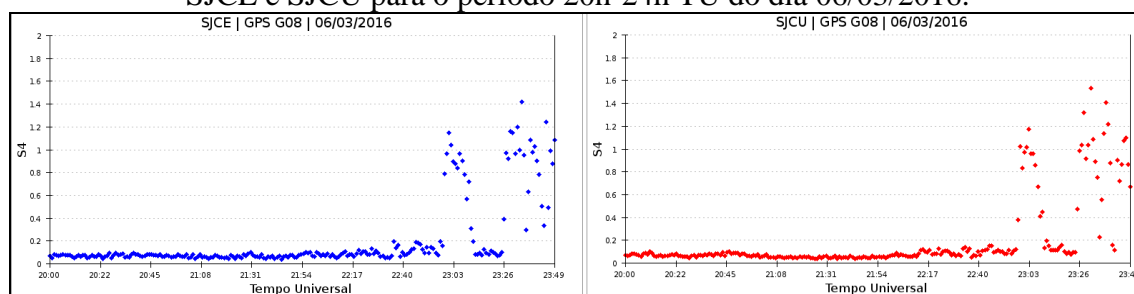


Figura 69 – Índice S4 do satélite G08 obtidos a partir da portadora L1, referente às estações SJCE e SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.



Fonte: ISMR Query Tool.

Figura 70 – Mapas dos índices f_p (23h45-24h TU), F_p (23h-24h TU), I_{ROT} (23h45-24h TU) e ROTI (23h45-23h50 TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 06/03/2016.

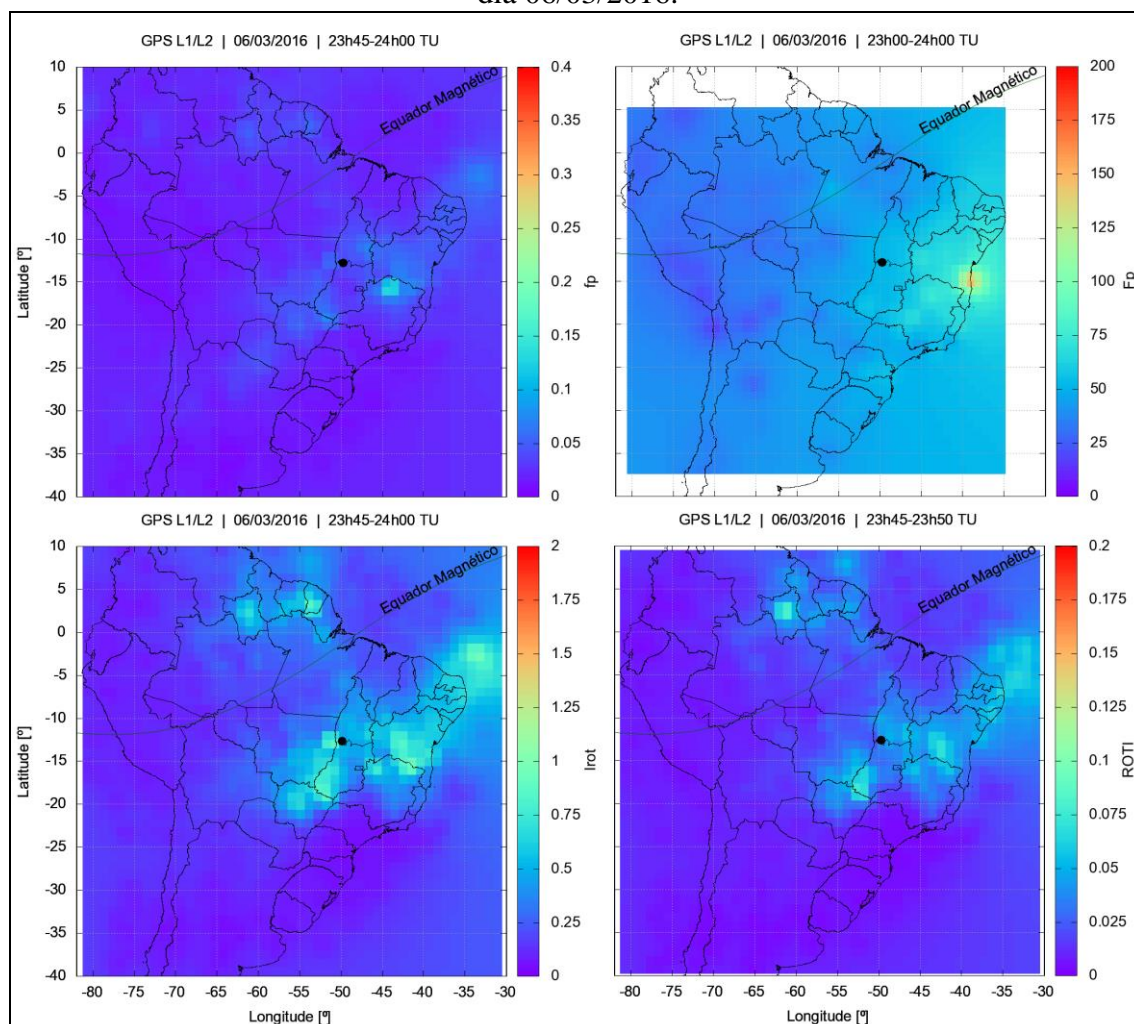
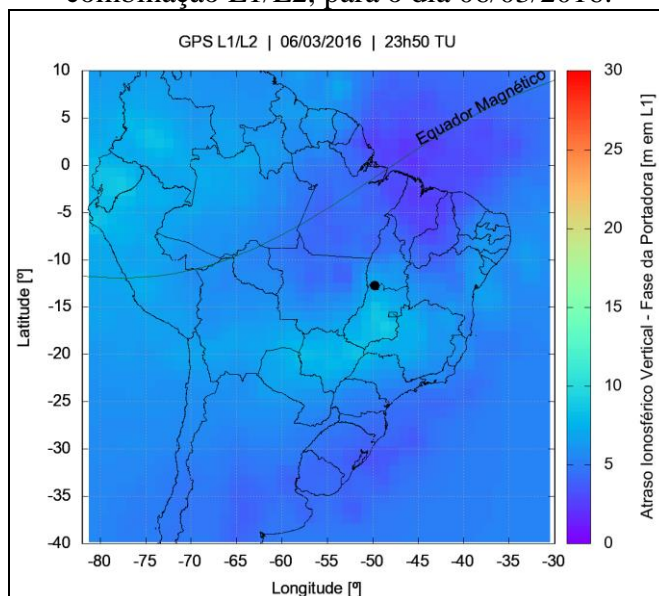


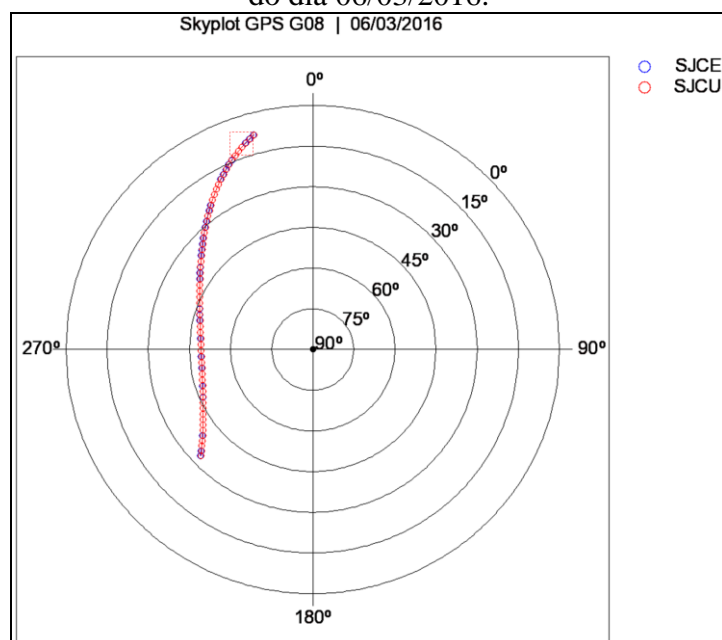
Figura 71 – Mapa de atraso ionosférico (23h50 TU) para os satélites GPS obtido a partir da combinação L1/L2, para o dia 06/03/2016.



A partir da Figura 68 verifica-se uma variação na densidade de elétrons durante 23h42 a 23h50 TU de aproximadamente 0,8 ROT, o que indica a presença de fortes irregularidades ionosféricas (I_{ROT} acima de 2 e ROTI superior a 0,2) em ambas as estações, sendo as irregularidades monitoradas na estação SJCE mais atuantes do que as apresentadas em SJCUC para o instante 23h 46min 30s TU. Ao analisar os valores de S4 da Figura 69 e os índices de irregularidades da Figura 68 conjuntamente nota-se uma grande correspondência, indicando que os sinais, ao atravessarem tais estruturas, sofrem cintilação ionosférica.

Comparando os mapas das irregularidades ionosféricas (Figura 70) e de atraso ionosférico (Figura 71) com o *skyplot* do satélite (Figura 72), sendo o ponto preto em destaque nos mapas a localização do IPP do satélite G08 e o quadrado vermelho no *skyplot* o instante de ocorrência do gradiente em questão, verifica-se que o deslocamento do IPP do satélite ocorre no sentido sul-norte e com baixa elevação, atravessando exatamente uma região de irregularidades ionosféricas, situação essa favorável para a ocorrência de elevados gradientes ionosféricos.

Figura 72 – Skyplot do satélite G08 referente ao par SJCE-SJCU para o período 20h-24h TU do dia 06/03/2016.



Portanto, diante do exposto, pode-se concluir que o gradiente não validado de valor 450,740 mm/km do satélite G08 do par SJCE-SJCU, ocorrido às 23h 46min 30s TU, é de fato devido a distúrbios ionosféricos, sendo o mesmo mantido na estimativa dos parâmetros. Os demais gradientes contidos no arquivo “2016_066_glf_vf_GPS_L1L2.txt” (Figura 63) atendem aos critérios estabelecidos na tese. Por fim, a validação manual descrita é repetida para todos os demais arquivos.

Finalizada as etapas das operações finais I tem-se início as operações finais II, que consistem na determinação do σ_{vig} e do σ_{vig_infla} para todas as datas e na geração dos gráficos finais.

O *Sigma Overbounding Method* (LEE et al., 2007) é aplicado para a determinação do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical de cada satélite para cada dia. O diferencial do MoR_Ion_PP é que são estimados os desvios-padrão dos gradientes calculados tanto com as medidas de fase da portadora quanto com as medidas de pseudodistância filtrada, para as combinações de portadoras L1/L2 e L1/L5.

Com base nos gradientes ionosféricos inclinados validados, determinam-se os respectivos gradientes verticais, sendo os mesmos divididos em cinco blocos de acordo com as distâncias entre as estações que formam os pares: 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km. Para cada bloco são determinados a média (μ_{vig}) e o desvio-padrão (σ_{vig}) de cada satélite, os quais são utilizados para normalizar os gradientes. Assim, com base

na FDP dos gradientes ionosféricos verticais normalizados, determina-se o fator de inflação (f) para cada satélite de cada intervalo. Por fim, o $\sigma_{\text{vig_infla}}$ é calculado utilizando a equação (62). Os resultados gerados, como os gráficos de FDP e de μ_{vig} , σ_{vig} e $\sigma_{\text{vig_infla}}$, além de arquivos contendo os respectivos valores, são disponibilizados ao final dessa etapa, podendo ser utilizados para os cálculos pós-processados dos níveis de proteção horizontal e vertical da aeronave. As Figuras 73 e 74 apresentam, respectivamente, as FDP dos gradientes ionosféricos verticais normalizados e os valores de μ_{vig} , σ_{vig} e $\sigma_{\text{vig_infla}}$ para os satélites GPS (combinações L1/L2 e L1/L5) provenientes dos pares ICEA-SJCU, LSJK-SJCU, SJCE-SJCU e SJCU-SJSP (bloco 0-50 km) do dia 06/03/2016. Ressalta-se que, na Figura 74, “Méd.” representa μ_{vig} , “DP.” significa σ_{vig} e “DPi.” trata-se do $\sigma_{\text{vig_infla}}$. Observam-se também pelas figuras que somente os satélites cujos sinais proporcionam estimativas de gradientes são apresentados.

Figura 73 – FDP dos gradientes ionosféricos verticais normalizados para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes aos pares para o caso do aeroporto SBSJ para o dia 06/03/2016.

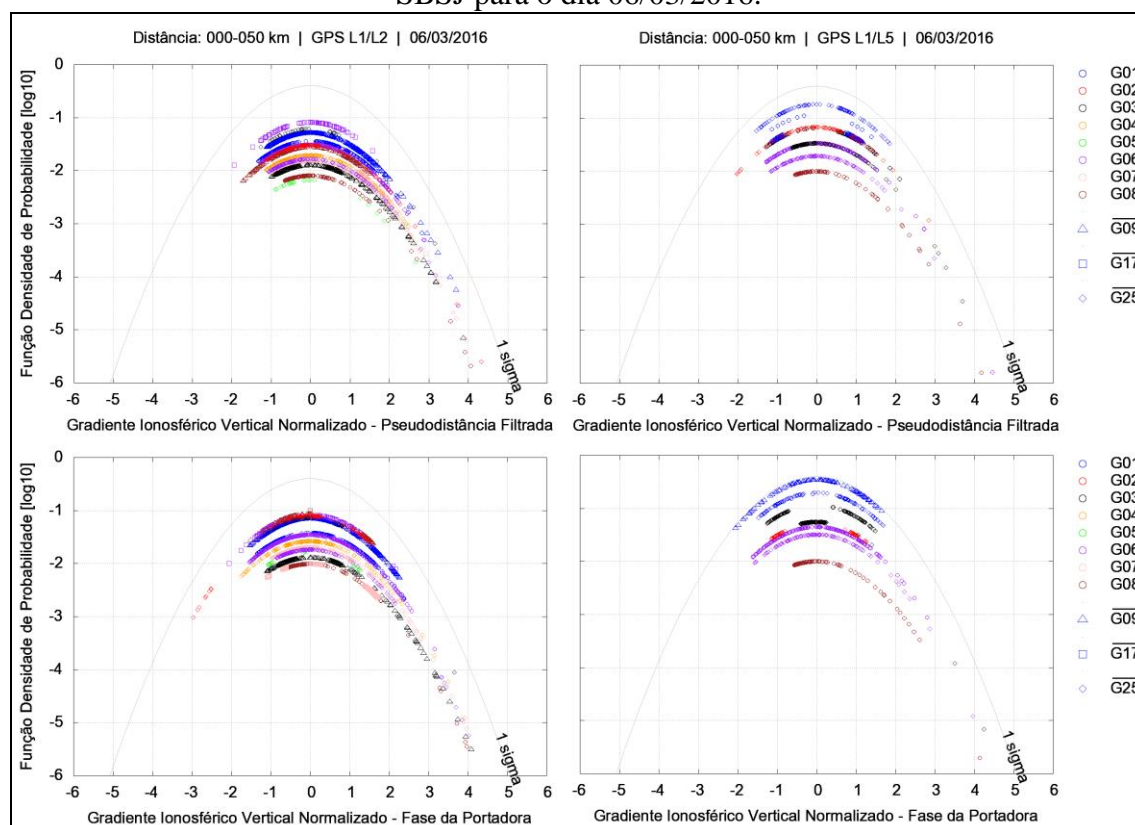
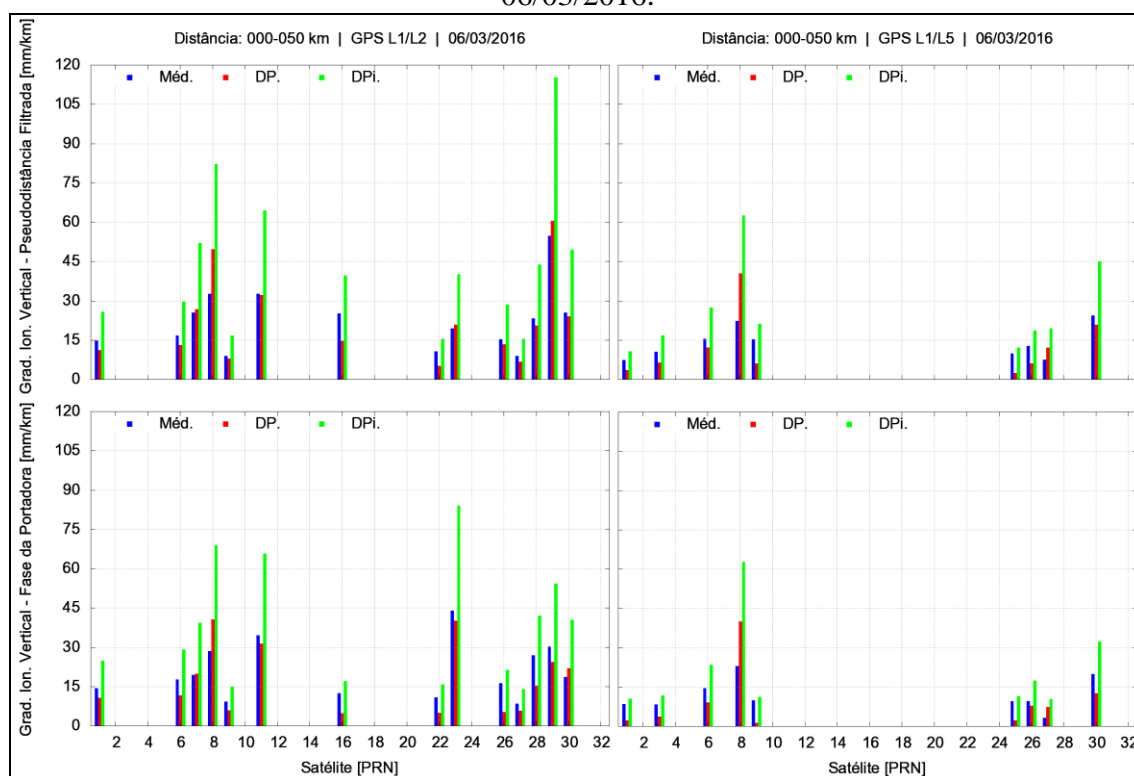


Figura 74 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir das combinações L1/L2 e L1/L5, referentes aos pares para o caso do aeroporto SBSJ para o dia 06/03/2016.



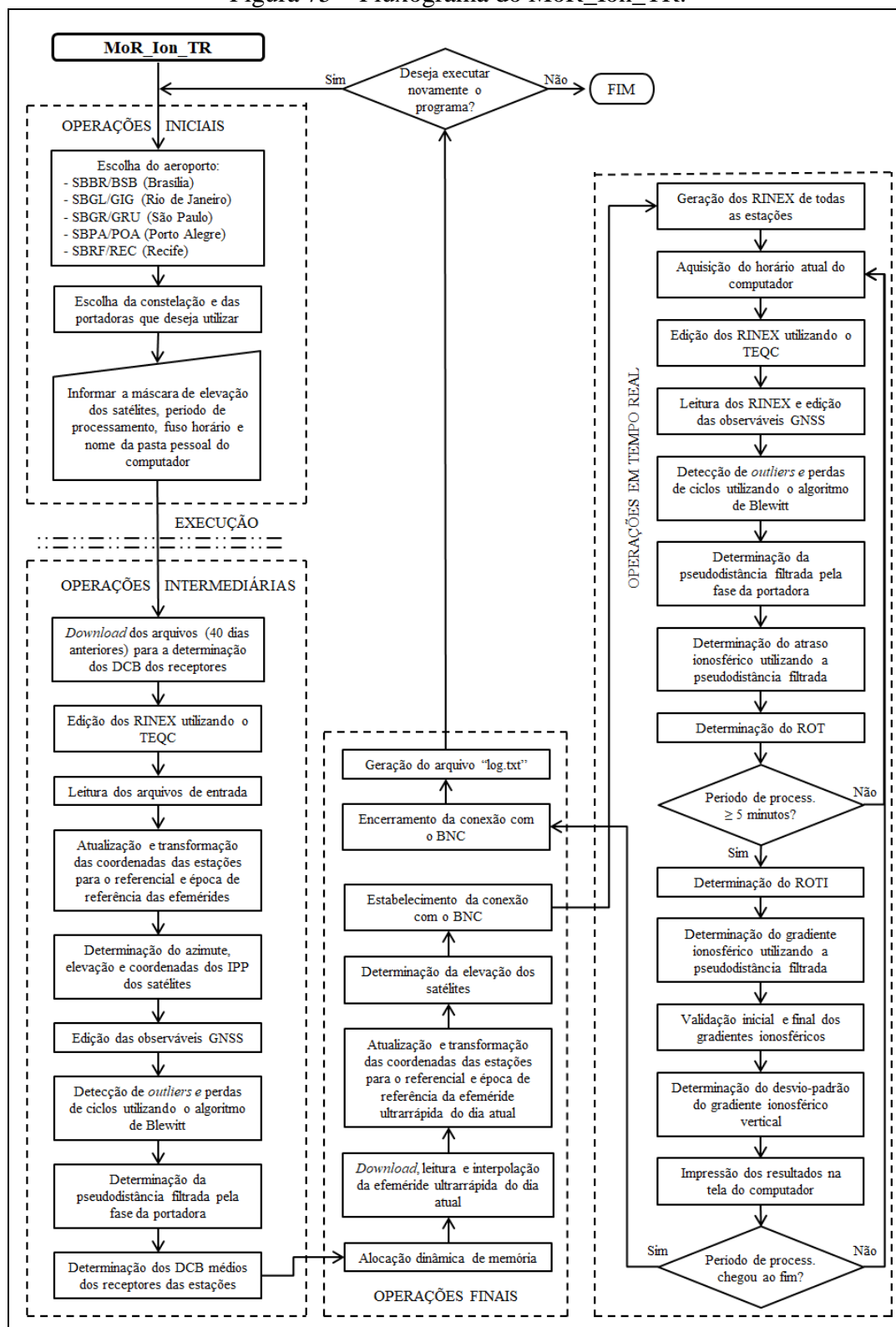
A última etapa consiste na geração dos gráficos finais. Além do tradicional gráfico que compara os gradientes ionosféricos com a elevação dos satélites, elaboram-se, também, gráficos que relacionam os gradientes com: ano, azimuth do par de estações, direção da frente ionosférica, distância entre as estações do par, extensão da frente ionosférica, latitude geomagnética do IPP, longitude do IPP, satélite, tempo universal e velocidade da frente ionosférica. Além dessa variedade de gráficos, realiza-se, também, para cada tipo, uma distinção dos dados em relação às estações do ano (outono, inverno, primavera e verão), de forma que seja possível identificar prováveis comportamentos que estejam associados à variabilidade sazonal.

5.2 Modalidade – Estimativa do Desvio-Padrão do Gradiente Ionosférico Vertical (Tempo Real)

O MoR_Ion_TR é dividido em quatro tipos de operações: iniciais, intermediárias, finais e em tempo real. Várias etapas dessas operações são congêneres da modalidade pós-processada, descrita na seção 5.1, conforme pode ser verificado ao se

comparar o fluxograma pós-processado (Figura 52) com o em tempo real apresentado na Figura 75.

Figura 75 – Fluxograma do MoR_Ion_TR.



Assim, são descritas na sequência as principais diferenças existentes entre as duas modalidades, sendo o desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical (σ_{vig}) o principal resultado determinado em tempo real.

Primeiramente, ao executar o programa, o usuário deve informar algumas configurações iniciais: aeroporto para o qual deseja determinar o σ_{vig} ; tipo de constelação de satélites e de combinação de portadoras; máscara de elevação; período de processamento; fuso horário; e nome da pasta pessoal do computador.

Diferentemente do modo pós-processado, em que três tipos de estimativas podem ser selecionados (geral, regional ou para um aeroporto), no modo tempo real são pré-estabelecidos os pares de estações somente para os seguintes aeroportos: aeroporto internacional de Brasília/DF – “Presidente Juscelino Kubitschek” (SBBR), aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ – “Galeão” (SBGL), aeroporto internacional de São Paulo/SP – “Cumbica” (SBGR), aeroporto internacional de Porto Alegre/RS – “Salgado Filho” (SBPA) e aeroporto internacional de Recife/PE – “Gilberto Freyre” (SBRF).

Independentemente da escolha, os possíveis pares de estações são definidos a priori, considerando um raio de busca de 500 km em relação à localização do aeroporto e uma distância máxima de 250 km entre as estações dos pares. As Figuras 76 a 80 apresentam as geometrias para cada aeroporto disponível (representado por um losango verde).

Figura 76 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBBR para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.

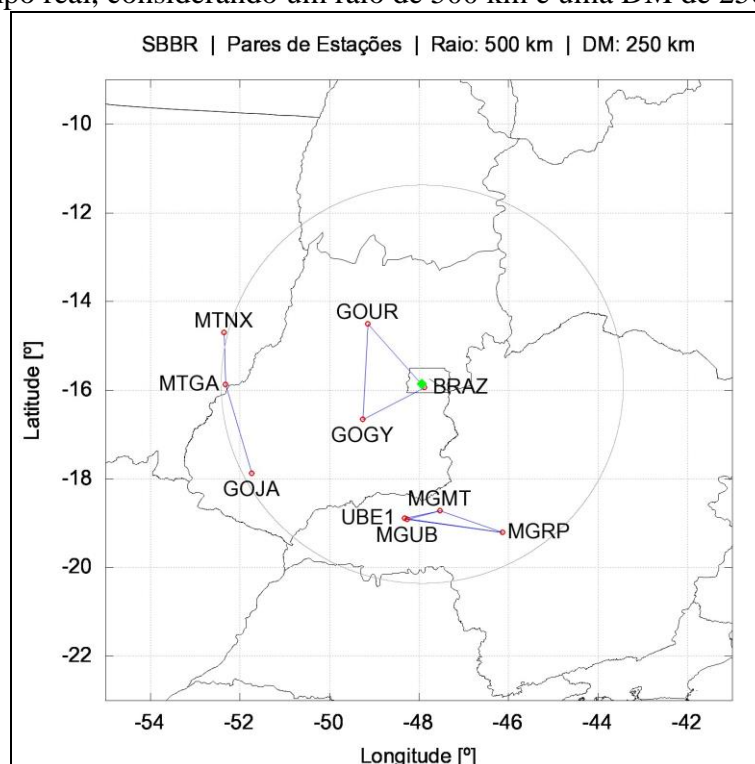


Figura 77 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBGL para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.

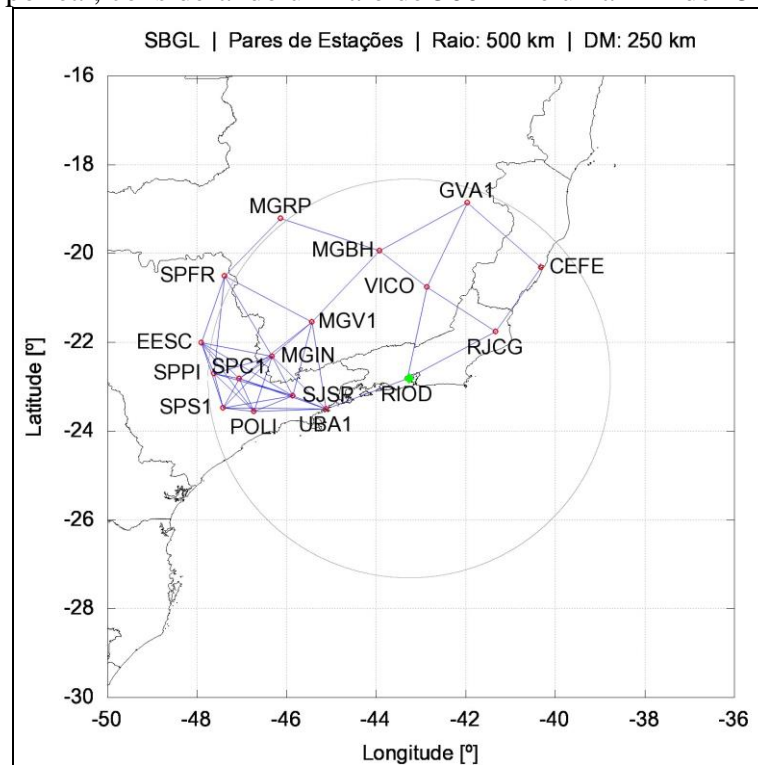


Figura 78 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBGR para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.

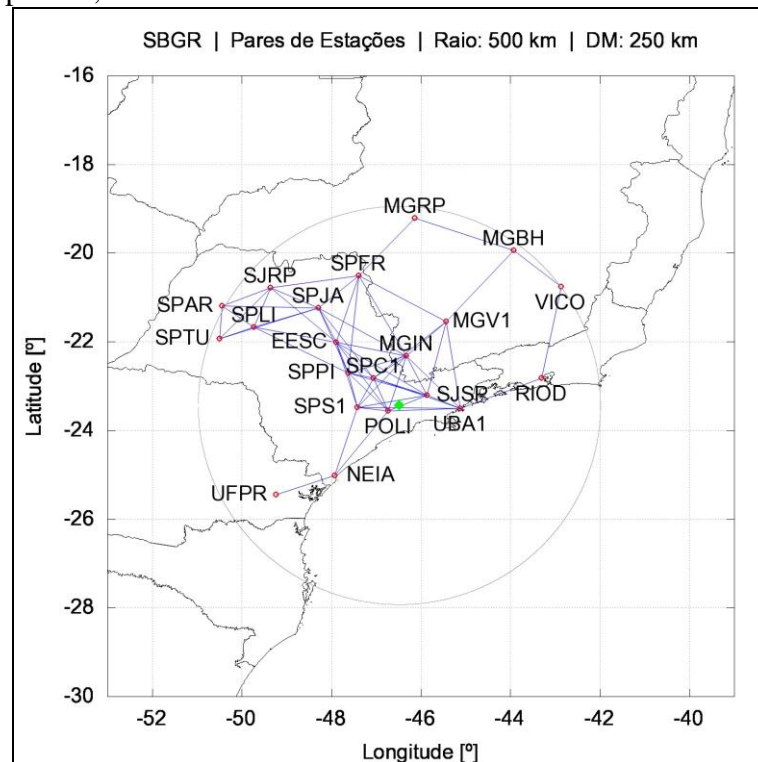


Figura 79 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBPA para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.

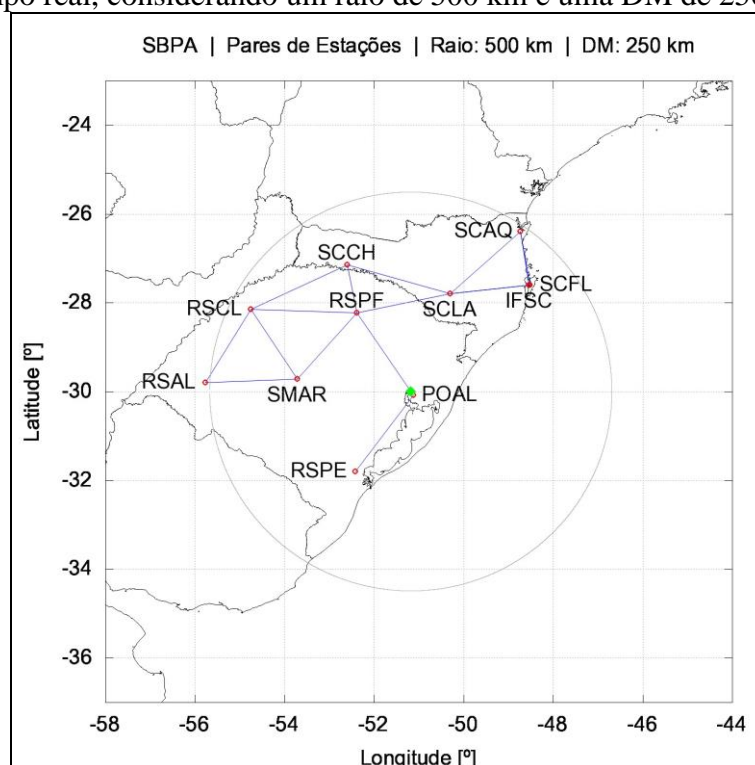
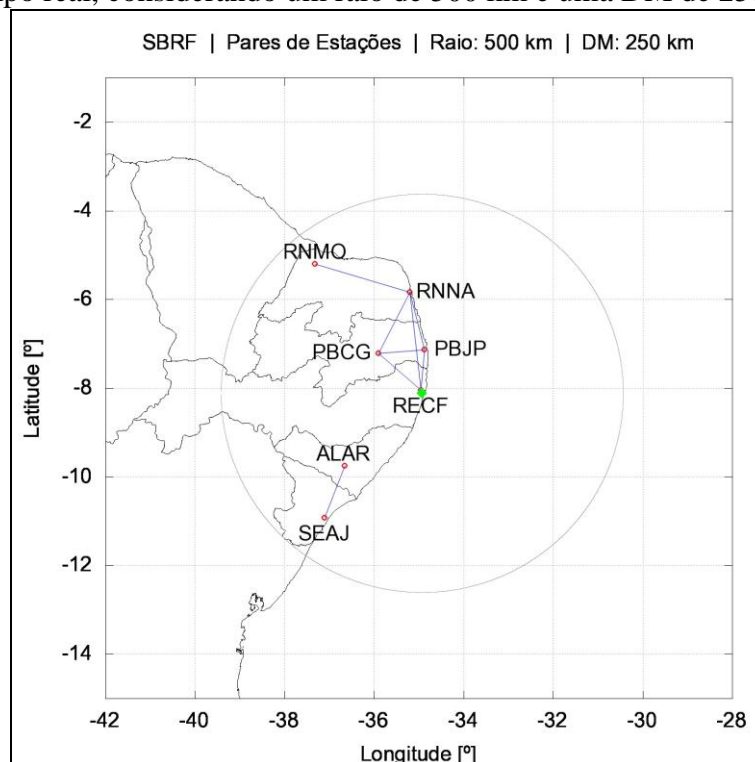


Figura 80 – Possíveis pares de estações para o caso do aeroporto SBRF para a modalidade em tempo real, considerando um raio de 500 km e uma DM de 250 km.



Para o aeroporto SBRR são formados, no máximo, 11 pares a partir das 10 estações da RBMC-IP contidas no raio de busca (Figura 76). Para o Galeão tem-se 46

possíveis pares de estações a partir das 17 estações selecionadas (Figura 77). Já para o aeroporto de Cumbica são estabelecidos 62 pares combinando as 21 estações disponíveis (Figura 78). Utilizando as 11 estações e respeitando a DM de 250 km são formados, no máximo, 11 pares para o aeroporto SBPA (Figura 79). Por fim, devido à escassez e às grandes distâncias entre as estações da RBMC-IP na região nordeste, são compostos apenas oito pares para o entorno do aeroporto Gilberto Freyre (Figura 80).

Em relação à constelação de satélites e à combinação de portadoras, o programa realiza apenas o processamento dos sinais GPS e/ou GLONASS para L1/L2.

Estabelecido no programa que, para a determinação dos gradientes ionosféricos pelo *station-pair method*, em tempo real, são utilizados apenas os valores de atrasos estimados com medidas de pseudodistância filtrada pela fase, tem-se que é necessário, além de tais medidas, os valores dos DCB dos receptores que formam os pares, haja vista que os DCB dos satélites são eliminados na diferenciação.

Devido à impossibilidade de se estimar o DCB do receptor em tempo real utilizando a técnica proposta por Prol e Camargo (2014), pois os IONEX são fornecidos em arquivos diários e os de DCB dos satélites em arquivos mensais, é aplicada no programa a seguinte abordagem para contornar essa questão: determinam-se os DCB dos receptores das estações, de forma análoga ao modo pós-processado, para os 40 dias anteriores do dia atual e calculam-se as médias e os respectivos desvios-padrão. Assim, são considerados válidos os DCB médios cujos desvios não forem superiores a um nanossegundo. Caso contrário as estações e, conseqüentemente os pares, são invalidados para a determinação dos gradientes.

Para obter a elevação dos satélites GPS e/ou GLONASS para um tempo futuro, ou seja, para o período de processamento informado, faz-se o uso das coordenadas cartesianas preditas dos satélites presentes nas efemérides ultrarrápidas.

O processamento em tempo real se inicia com a conexão do BNC (*BKG NTRIP Client*). Nessa etapa é gerado um *script* “BNC.bnc” contendo todos os parâmetros de conexão com o *caster* da RBMC-IP, como por exemplo, os *mountpoints* das estações, *login* e senha de acesso, o diretório onde será salvo os arquivos RINEX de observações, etc.

Estabelecida a conexão, arquivos RINEX de observações para todas as estações do aeroporto selecionado são gerados, sendo os mesmos atualizados a cada segundo com a introdução das observáveis GNSS da época corrente (atual).

Uma vez que os arquivos RINEX são gerados e atualizados pelo BNC, optou-se por editá-los utilizando o TEQC, onde arquivos temporários contendo apenas as observáveis da época corrente são criados. Esse método visa eliminar problemas de leitura

que possam vir a surgir, problemas quanto à correspondência temporal entre todos os arquivos de observações das estações, e a falha na transmissão das observáveis GNSS de alguma estação para um determinado período de tempo.

A leitura dos arquivos RINEX e a edição dos dados pelo TEQC são realizadas concomitantemente, ou seja, antes de armazenar os valores de fase e de pseudodistância das portadoras L1 e L2, verifica-se se as quatro medidas estão disponíveis e, no cenário de disponibilidade, aplica-se a máscara de elevação dos satélites.

As determinações das medidas de pseudodistância filtrada pela fase da portadora e, na sequência, dos atrasos ionosféricos e dos gradientes ionosféricos para cada época corrente somente são realizadas se houver os valores de fase e de pseudodistância em L1 e L2 para cada satélite e se os desvios-padrão dos DCB médios calculados para os receptores forem menores que um nanossegundo.

O método para o cálculo do ROT é o mesmo apresentado na seção 5.1, sendo que, em tempo real, aplica-se uma janela de um minuto e um deslocamento de um segundo, possibilitando, dessa forma, a obtenção de um valor de ROT para o sinal de cada satélite rastreado, a cada segundo.

Conforme proposta, a validação semiautomática na modalidade pós-processada consiste de três passos: validação automática inicial, final e validação manual. Já em tempo real, por sua vez, são executadas apenas as validações automáticas inicial e final, dada a impossibilidade da verificação manual dos gradientes. Em relação à validação automática inicial, utiliza-se apenas o índice ROTI para realizar tal validação, devido à sua alta resolução temporal. Assim, são considerados validados inicialmente os gradientes, para a época corrente, se o ROTI de uma das estações do par apresentar valor maior que 0,05. A respeito do índice ROTI, para que seja estimado a cada segundo, aplica-se novamente o conceito de janela deslizante, sendo a janela de cinco minutos e o deslocamento de um segundo; desse modo a validação inicial é aplicada apenas quando o primeiro valor de ROTI for obtido; isto é, após os cinco minutos iniciais de processamento.

Determinados os gradientes iniciais de cada par, realizam-se as comparações com os pares vizinhos, sendo que para cada aeroporto já são definidos os possíveis tipos de comparações. Caso a maioria dos gradientes dos pares vizinhos apresente discrepâncias inferiores a 200 mm/km com os gradientes do par que estão sendo analisados, os últimos gradientes são classificados como finais.

Por fim, são determinados três tipos de desvios-padrão dos gradientes ionosféricos para cada um dos cinco blocos de distâncias (0-50 km, 50-100 km, 100-150 km,

150-200 km e 200-250 km), bem como para o bloco de 0 a 250 km, o qual contempla todos os possíveis pares: desvio-padrão dos gradientes sem aplicação das validações (denominada de “sv”); após a aplicação da validação automática inicial (“vi”); e após a aplicação da validação automática final (“vf”).

Salienta-se que os desvios-padrão obtidos correspondem ao σ_{vig} do *Sigma Overbounding Method*, e não ao σ_{vig_infla} , pois não é realizada a determinação do fator de inflação para cada satélite de cada intervalo.

Os valores de σ_{vig} de cada satélite rastreado para cada época são impressos em tempo real na tela do programa. Para fins de exemplificação, a Figura 81 apresenta a captura da tela do programa referente ao aeroporto SBBR, para os instantes 12h 41min 09s e 12h 41min 10s TU do dia 19 de fevereiro de 2018, considerando os satélites GPS e GLONASS (combinação L1/L2) e uma máscara de elevação de 10°. Ressalta-se que os desvios-padrão dos gradientes iniciais (“vi”) e, conseqüentemente os finais (“vf”), são nulos, pois não houve distúrbios ionosféricos durante o processamento em tempo real. Adicionalmente, que não há valores de σ_{vig} para os blocos 0-50 km e 100-150 km devido à presença de apenas um par de estações em cada bloco, o que inviabiliza a estimativa do desvio-padrão.

Figura 81 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBBR, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 19/02/2018.

Sigma-VIG [mm/km] g1pF GPS e GLONASS L1/L2																		
Sat[PRN]	Dist 000-250 [km]			Dist 000-050 [km]			Dist 050-100 [km]			Dist 100-150 [km]			Dist 150-200 [km]			Dist 200-250 [km]		
	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf
G02	21.584	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.054	0.000	0.000	1.301	0.000	0.000
G05	2.248	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.658	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.720	0.000	0.000	0.935	0.000	0.000
G12	29.253	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.158	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.113	0.000	0.000	1.303	0.000	0.000
G20	18.648	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.916	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300	0.000	0.000	0.731	0.000	0.000
G21	15.627	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.946	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.181	0.000	0.000	0.624	0.000	0.000
G24	13.297	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.319	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.444	0.000	0.000	0.651	0.000	0.000
G25	0.441	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.238	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.362	0.000	0.000	0.398	0.000	0.000
G29	8.410	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.852	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.570	0.000	0.000	0.520	0.000	0.000
R10	59.765	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10.082	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.202	0.000	0.000
R11	89.511	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.691	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.810	0.000	0.000
R21	41.530	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.957	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.663	0.000	0.000
R22	73.888	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.477	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.750	0.000	0.000
R23	23.542	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.737	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

=== 12h 41min 09s (TU) ===

Sigma-VIG [mm/km] g1pF GPS e GLONASS L1/L2																		
Sat[PRN]	Dist 000-250 [km]			Dist 000-050 [km]			Dist 050-100 [km]			Dist 100-150 [km]			Dist 150-200 [km]			Dist 200-250 [km]		
	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf
G02	21.620	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.072	0.000	0.000	1.303	0.000	0.000
G05	2.461	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.722	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.727	0.000	0.000	0.934	0.000	0.000
G12	29.230	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.125	0.000	0.000	1.302	0.000	0.000
G20	18.663	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.902	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.307	0.000	0.000	0.729	0.000	0.000
G21	15.661	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.953	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.166	0.000	0.000	0.628	0.000	0.000
G24	13.316	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.345	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.463	0.000	0.000	0.694	0.000	0.000
G25	0.285	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.206	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.366	0.000	0.000	0.393	0.000	0.000
G29	8.355	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.843	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.580	0.000	0.000	0.523	0.000	0.000
R10	59.530	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.193	0.000	0.000
R11	89.507	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.680	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.817	0.000	0.000
R21	41.601	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.905	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.670	0.000	0.000
R22	74.092	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.512	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.760	0.000	0.000
R23	23.685	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.728	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

=== 12h 41min 10s (TU) ===

Ao término do processamento é gerado um arquivo denominado “log.txt”, o qual contém todas as informações processadas em tempo real pelo programa.

6 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Para a investigação da usabilidade do modelo CONUS de risco ionosférico no território brasileiro foi realizado, primeiramente, um estudo das irregularidades ionosféricas durante os ciclos solares 23 e 24 a partir do uso de índices, com o objetivo de analisar as irregularidades em termos de horários de ocorrência, áreas de abrangência e níveis de intensidade.

A estimativa dos parâmetros do modelo de risco considerando todo o território do Brasil foi realizada a partir do uso das observáveis nas portadoras L1 e L2 para os satélites GPS, levando em consideração a variação temporal, inicialmente prevista apenas para os casos dos aeroportos.

Na sequência foram estimados os parâmetros local-temporais para cinco aeroportos internacionais brasileiros: aeroporto internacional de São Paulo/SP – “Cumbica” (SBGR), aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ – “Galeão” (SBGL), aeroporto internacional de Brasília/DF – “Presidente Juscelino Kubitschek” (SBBR), aeroporto internacional de Porto Alegre/RS – “Salgado Filho” (SBPA) e aeroporto internacional de Recife/PE – “Gilberto Freyre” (SBRF). Também foi considerado apenas medidas nas portadoras L1 e L2 do GPS.

Experimentos com vistas à investigação e análise do emprego da portadora L5 do GPS e dos sinais GLONASS (combinação L1/L2) e Galileo (combinação L1/L5) no processo de estimativa dos parâmetros do modelo do CONUS também foram realizados.

A estimativa do σ_{vig} em tempo real para os aeroportos selecionados a partir da utilização de medidas de pseudodistância filtrada pela fase nas portadoras L1 e L2 dos satélites GPS e GLONASS e, por conseguinte, a determinação dos níveis VPL e HPL da aeronave também são experimentos apresentados na sequência. Ressalta-se que a determinação dos níveis de proteção em tempo real foi realizada apenas para a aproximação e pouso preciso no aeroporto do Galeão, haja vista que foram utilizados dados do GBAS instalado no aeroporto, bem como, informações de voo de aeronave. A avaliação da técnica *Screening* na estimativa de VPL e HPL, utilizando satélites GPS e/ou GLONASS, também foi realizada.

O penúltimo experimento consistiu em um estudo de caso referente à estimativa e análise de gradientes ionosféricos a partir do *time-step method*, para o dia 6 de março de 2016, para a região circundante do aeroporto de São José dos Campos/SP (SBSJ). Tal análise visou apresentar as vantagens e desvantagens do uso de gradientes ionosféricos

dessa natureza a partir da comparação com os gradientes provenientes do *station-pair method*, uma vez que os primeiros gradientes possuem correlação temporal.

Por fim, o último experimento tratou-se do monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real para a circunvizinhança do aeroporto do Galeão, a partir do emprego dos sinais GPS e GLONASS nas portadoras L1 e L2, provenientes das estações da RBMC-IP. O intuito de tal experimento foi empregar rede ativa como sistema de monitoramento da camada ionosférica para suporte à navegação aérea, sendo a aproximação e pouso preciso realizado apenas quando as condições ionosféricas no aeroporto forem favoráveis.

6.1 Identificação, Delimitação e Intensidade das Irregularidades Ionosféricas para os Ciclos Solares 23 e 24

Índices de irregularidades da ionosfera e o ROT, bem como, valores de atrasos ionosféricos foram estimados para o território brasileiro durante os períodos de outono, inverno, primavera e verão dos ápices dos ciclos solares 23 e 24, além para o verão do declínio do ciclo 23 e da ascensão do ciclo 24.

Para analisar os resultados desses períodos foram selecionadas algumas estações e dias característicos em que ocorreram fracas, moderadas e fortes irregularidades ionosféricas e tempestades geomagnéticas: para o outono do ápice do ciclo 23 foi escolhido o dia 7 de abril de 2000 ($K_p = 8,7$ e $D_{st} = -288$ nT), para o inverno o dia 15 de julho de 2000 ($K_p = 9,0$ e $D_{st} = -289$ nT), para a primavera o dia de 30 de outubro de 2003 ($K_p = 9,0$ e $D_{st} = -383$ nT) e para o verão o dia 7 de novembro de 2001 ($K_p = 5,7$ e $D_{st} = -165$ nT), ao passo que o verão do declínio do ciclo 23 foi representado pelo dia 8 de novembro de 2004 ($K_p = 8,7$ e $D_{st} = -374$ nT); já para o ciclo solar 24 foram selecionados os seguintes dias: ascensão/verão – 14 de novembro de 2012 ($K_p = 6,3$ e $D_{st} = -108$ nT), ápice/outono – 1 de março de 2014 ($K_p = 2,7$ e $D_{st} = -50$ nT), ápice/inverno – 21 de junho de 2014 ($K_p = 2,0$ e $D_{st} = -23$ nT), ápice/primavera – 2 de outubro de 2013 ($K_p = 7,7$ e $D_{st} = -67$ nT) e ápice/verão – 9 de novembro de 2013 ($K_p = 5,0$ e $D_{st} = -81$ nT).

As Figuras 82 e 83 apresentam, para fins exemplificativos, os índices e o ROT para os satélites GPS na combinação L1/L2 das datas para o verão do ciclo 23, referentes às estações RIOD, BRAZ e VICO. Já as Figuras 84 e 85 os resultados para os satélites GPS e GLONASS nas portadoras L1 e L2 das datas do verão do ciclo 24, referentes a VICO. Para todas as datas foi considerada uma máscara de elevação de 10° .

Figura 82 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações RIOD e VICO para o dia 07/11/2001 (ciclo 23/ápice/verão).

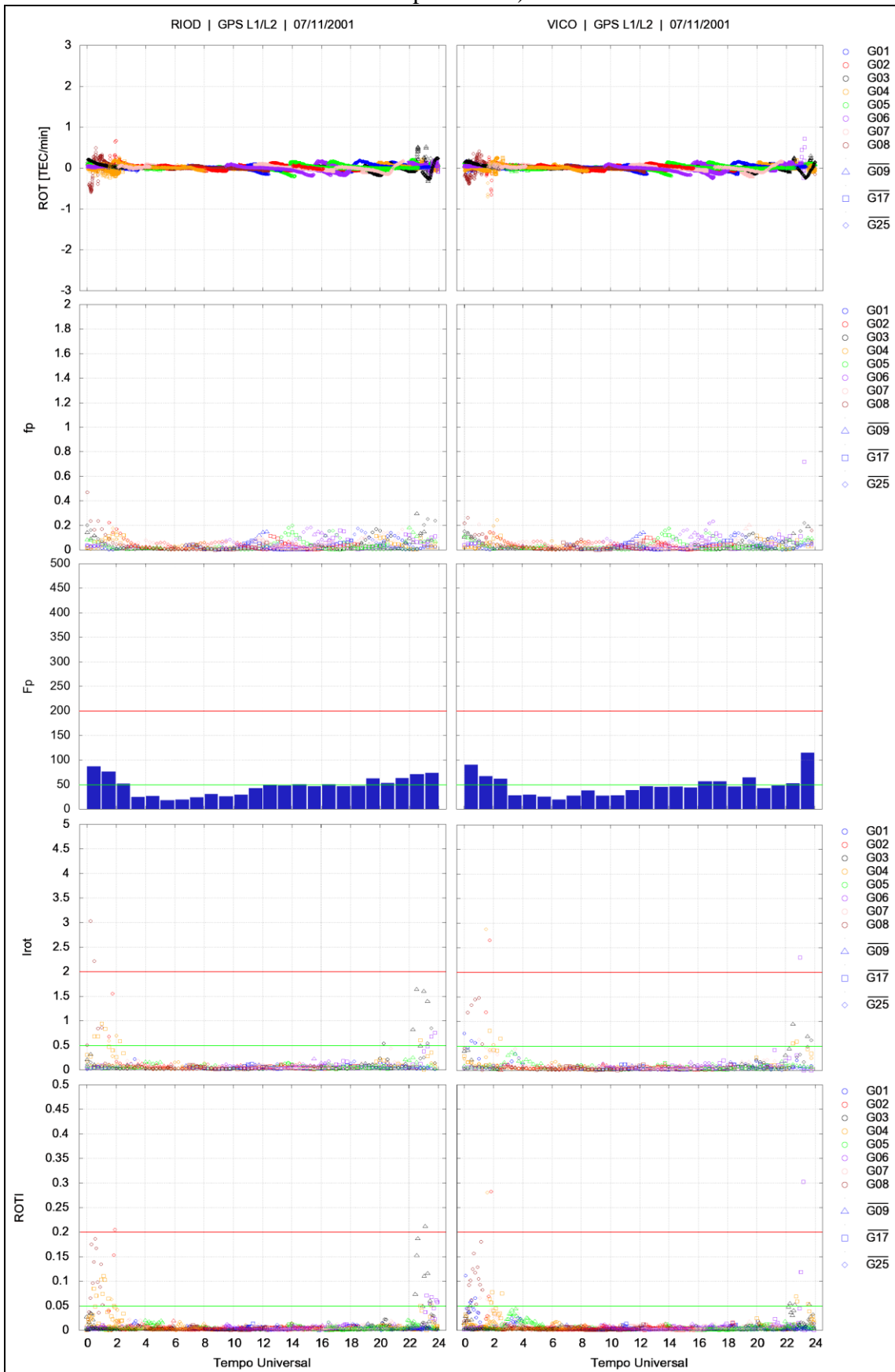


Figura 83 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações BRAZ e VICO para o dia 08/11/2004 (ciclo 23/declínio/verão).

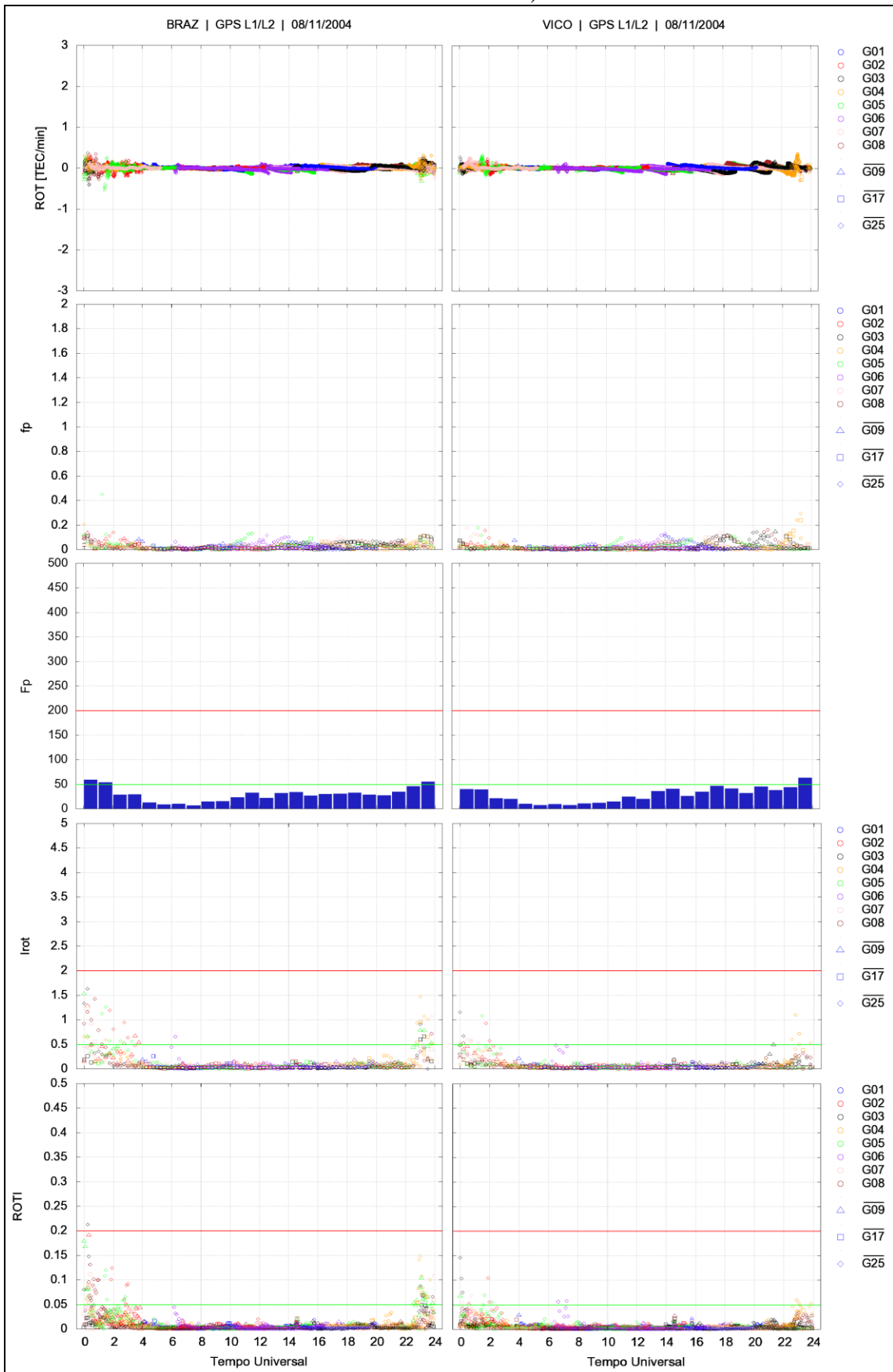


Figura 84 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 14/11/2012 (ciclo 24/ascensão/verão).

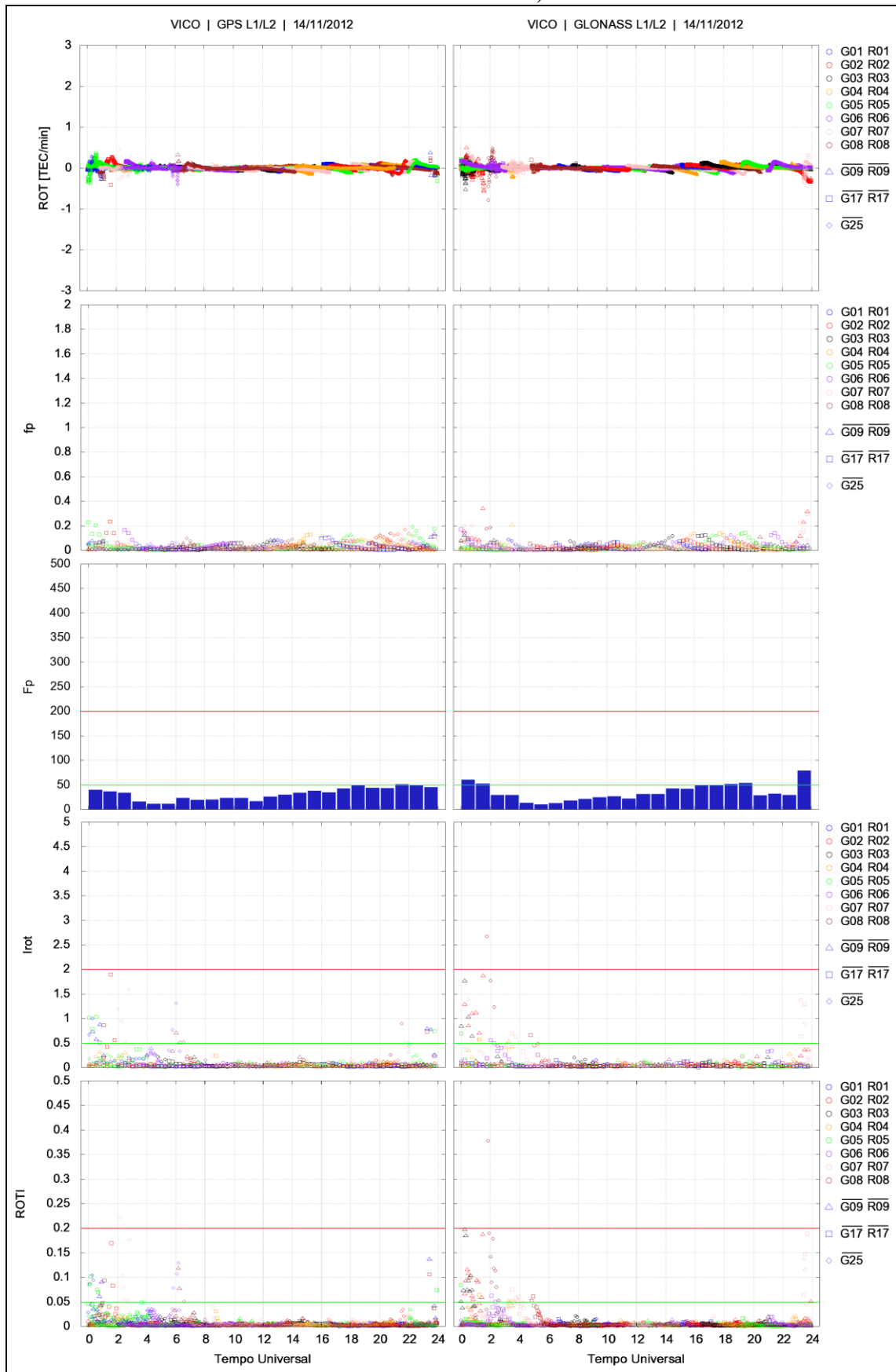
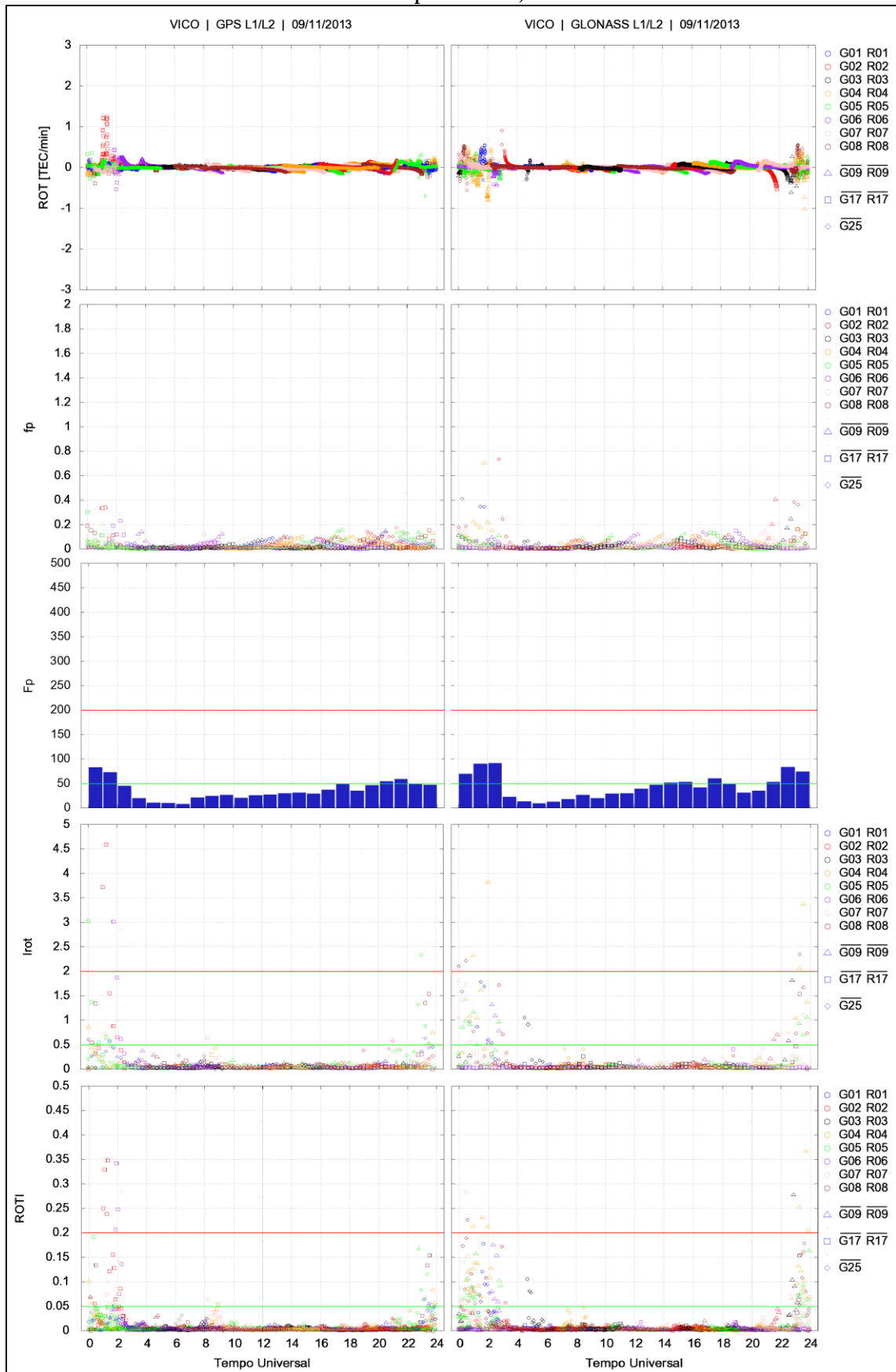


Figura 85 – ROT e índices f_p , F_p , I_{ROT} e ROTI para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 09/11/2013 (ciclo 24/ápice/verão).



De uma forma geral, comparando os índices de irregularidades referentes aos ciclos solares 23 e 24 verifica-se que as irregularidades ionosféricas foram mais fortes e atuantes durante o ciclo 23, devido principalmente à intensa atividade solar, comprovada pelo número de manchas solares das Figuras 17 e 18.

Durante os períodos de outono, primavera e verão (Figura 82) do ápice do ciclo 23 os índices de irregularidades atingiram valores que classificam a intensidade das irregularidades de moderada a forte, com destaque para os dias 7 de abril de 2000 (outono) e 30 de outubro de 2003 (primavera), em que os resultados foram mais acentuados: valores de F_p superiores a 200, I_{ROT} maiores que 2 e ROTI maiores que 0,2 durante o período das 22h às 5h TU (19h às 2h local), sendo que para as demais horas do dia os valores permaneceram no limiar considerado como irregularidade moderada. Em relação aos níveis de irregularidades durante o inverno do ápice do ciclo 23 tem-se que, apesar de ser um período de mínima variabilidade da densidade de elétrons devido à variação sazonal, as irregularidades atingiram valores moderados. Em relação ao ciclo 24, as irregularidades ionosféricas apresentaram, em geral, um comportamento moderado.

Analisando cada dia selecionado do ciclo 23 tem-se que, para o dia 7 de abril de 2000, as estações localizadas próximas a crista sul da AIE apresentaram uma alta variabilidade da densidade de elétrons, da ordem 1 ROT, o que traduz em elevados índices de irregularidades: F_p máximo de 260, I_{ROT} de 4,8 e ROTI de 0,48. Já durante o inverno os valores de ROT das estações não foram superiores, em módulo, a 0,5, entretanto, valor esse o suficiente para propiciar irregularidades moderadas, com F_p da ordem de 80 TECU/min, I_{ROT} em 1,5 TECU/min e ROTI de 0,130 TECU/min. Durante o verão do ápice (Figura 82) o comportamento não foi diferente das estações do outono e da primavera, sendo os valores máximos de F_p , I_{ROT} e ROTI iguais a 120, 3,1 e 0,31, respectivamente, fato esse que corrobora a variação sazonal da densidade de elétrons na ionosfera. Ao se comparar os índices dos dias 7 de novembro de 2001 (Figura 82) e 8 de novembro de 2004 (Figura 83), em especial para a estação VICO, observa-se que os níveis de irregularidades da ionosfera foram mais elevados no ano de 2001, devido ser o período de ápice do ciclo, o qual é caracterizado por atividades solares intensas, o que reflete em uma maior ionização da camada ionosférica.

Em relação às datas do ciclo 24, durante o outono do ápice houve fortes irregularidades ionosféricas, atingindo I_{ROT} da ordem 4,9 e ROTI de 0,48 para os satélites GPS (L1/L2) e I_{ROT} e ROTI iguais a 4,5 e 0,45, respectivamente, para os satélites GLONASS (L1/L2). Durante o inverno a intensidade das irregularidades, tanto a partir do índice F_p quanto a partir dos índices I_{ROT} e ROTI foi classificada como baixa, como esperado devido ser

um período de mínima variabilidade na densidade de elétrons. Já durante a primavera e o verão (Figura 85) os níveis dos índices retornaram ao patamar de fortes irregularidades ionosféricas, atingindo um ROTI de 0,25 para os satélites GPS (L1/L2) durante a primavera e um ROTI de 0,36 para os satélites GLONASS (L1/L2) durante o verão. Comparando os índices dos dias 14 de novembro de 2012 (Figura 84) e 9 de novembro de 2013 (Figura 85), referentes aos períodos do verão da ascensão e ápice do ciclo 24, nota-se que a intensidade das irregularidades é maior no ano de 2013, devido ser um período de ápice em detrimento a um período de ascensão.

Outra forma de se analisar a intensidade das irregularidades ionosféricas é a partir do estudo do comportamento do atraso ionosférico durante os horários de ocorrência das irregularidades (geralmente das 22h às 5h TU), uma vez que o atraso é determinado a partir do TEC, e quando ocorrem irregularidades há uma variação no conteúdo total de elétrons. Assim, as Figuras 86 a 89 apresentam os valores de atrasos inclinados estimados com medidas de fase da portadora para as mesmas estações e dias utilizados na estimativa dos índices de irregularidades, tanto para o ciclo 23 quanto para o ciclo 24.

Figura 86 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações RIOD e VICO para o dia 07/11/2001 (ciclo 23/ápice/verão).

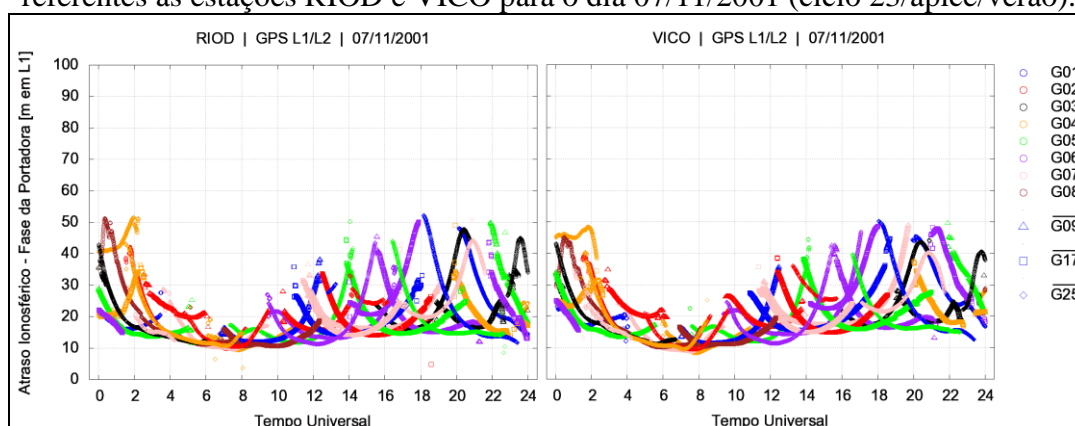


Figura 87 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes às estações BRAZ e VICO para o dia 08/11/2004 (ciclo 23/declínio/verão).

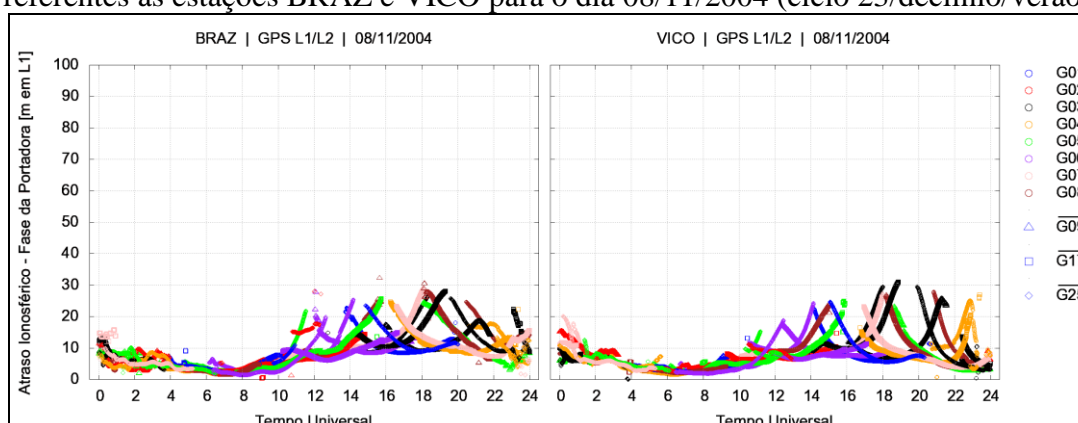


Figura 88 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS e GLONASS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 14/11/2012 (ciclo 24/ascensão/verão).

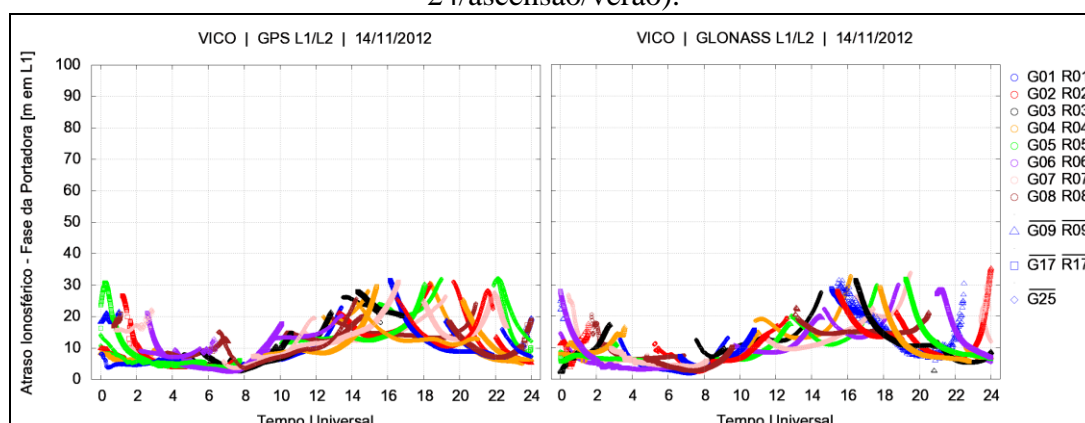
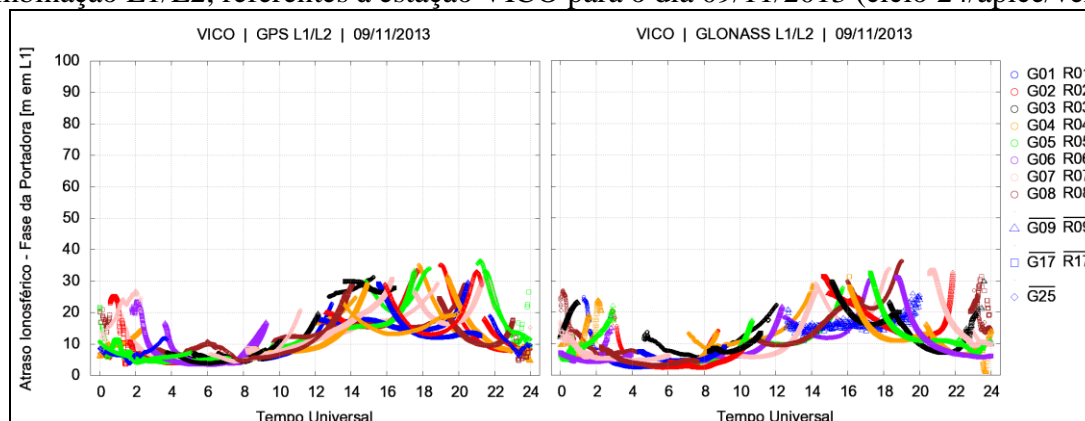


Figura 89 – Atrasos ionosféricos dos sinais GPS e GLONASS em L1 obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estação VICO para o dia 09/11/2013 (ciclo 24/ápice/verão).



Com exceção para o inverno do ápice do ciclo solar 24, os demais períodos apresentaram uma variabilidade acentuada nos valores de atrasos durante os horários de ocorrências das irregularidades ionosféricas.

A intensidade da variabilidade está intrinsicamente relacionada com a intensidade das irregularidades, conforme se observou, por exemplo, os valores de atrasos para os satélites GPS para as estações PARA e UEPP para o dia 7 de abril de 2000 e dos receptores das estações POAL e VICO do dia 30 de outubro de 2003. O satélite G30 rastreado pela estação PARA durante o outono do ciclo solar 23 exemplificou essa relação: o satélite apresentou um decréscimo abrupto no valor do atraso ionosférico de 76 para 61 m em um intervalo de tempo inferior a 5 minutos (0h55 às 1h TU); verificando a intensidade da irregularidade ionosférica determinada para o satélite em questão, tem-se um valor de I_{ROT} igual a 4,8 e um ROTI de 0,48, comprovando, dessa forma, que a variabilidade do atraso foi devido a forte irregularidade ionosférica atuante na região. Essa mesma análise pode ser aplicada aos demais satélites dos dias em estudo.

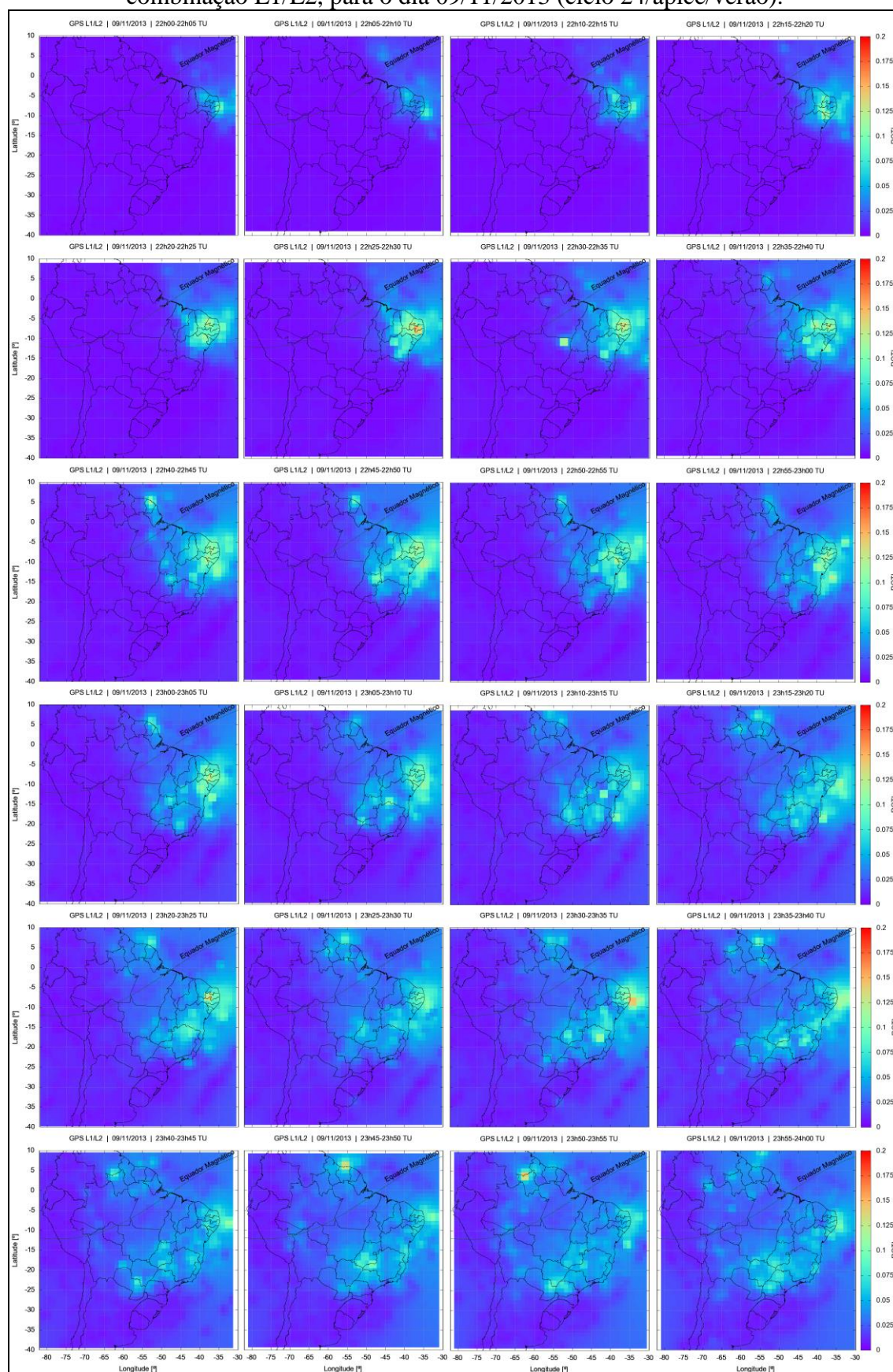
Comparando os atrasos ionosféricos na fase em L1 obtidos para o período do ciclo 23 com o período do ciclo 24 têm-se, mais uma vez, que as irregularidades ionosféricas foram mais intensas durante o primeiro ciclo em relação ao segundo. Embora as irregularidades sejam caracterizadas por variações na densidade de elétrons, nota-se que durante o ápice do ciclo 23 os atrasos estimados, na direção satélite-receptor, foram da ordem de 50 a 70 m, principalmente no outono e na primavera, ao passo que durante o mesmo período no ciclo 24 os valores oscilaram em torno de 35 m.

Com o intuito de visualizar o comportamento espacial e temporal das irregularidades ionosféricas, mapas de geovisualização do índice ROTI foram gerados para os dias em questão, sendo apresentado na Figura 90 apenas o período em que ocorreram fortes irregularidades no ápice do verão do ciclo 24. A sequência de apresentação dos mapas é da esquerda para a direita, de cima para baixo. Para a geração dos mapas foram utilizados os dados disponíveis das estações das redes ativas, considerando os sinais dos satélites GPS (L1/L2) e máscara de elevação de 10° .

Devido à baixa quantidade de estações disponíveis no Brasil durante o ciclo solar 23, a correta delimitação das irregularidades para esse período é impossível de ser realizada. Entretanto, a identificação pode ser realizada, sendo que durante o período das 0h às 4h TU (21h às 1h local) do dia 7 de abril de 2000 houve uma forte atividade ionosférica na região da crista sul da AIE, atingindo o máximo próximo às 1h TU e cessando em torno de 4h TU. O mesmo comportamento ocorre durante a primavera, sendo nesse caso iniciando-se às 21h TU e apresentando um máximo às 24h TU. A respeito do período do verão e levando em consideração que poucas estações estavam disponíveis, foi verificado que as irregularidades ionosféricas evoluíram com o passar do tempo, apresentando fortes níveis em vários intervalos.

Diferentemente do ciclo 23, durante o ciclo 24 há uma maior quantidade de estações para a realização da identificação e delimitação das irregularidades ionosféricas. Pela sequência de mapas do índice ROTI para o dia 9 de novembro de 2013 (Figura 90) observa-se o deslocamento espacial e temporal das gerações das irregularidades ionosféricas sobre o território brasileiro (coincidente com o terminador do dia), tendo início após o pôr do Sol por volta das 22h TU e término às 5h TU, de leste para oeste, ao sul e ao norte do equador magnético, atingindo principalmente os estados das regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Uma vez que são geradas as irregularidades, as bolhas ionosféricas se deslocam no sentido contrário, de oeste para leste, paralelo ao equador magnético.

Figura 90 – Mapas do índice ROTI (22h-24h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 09/11/2013 (ciclo 24/ápice/verão).



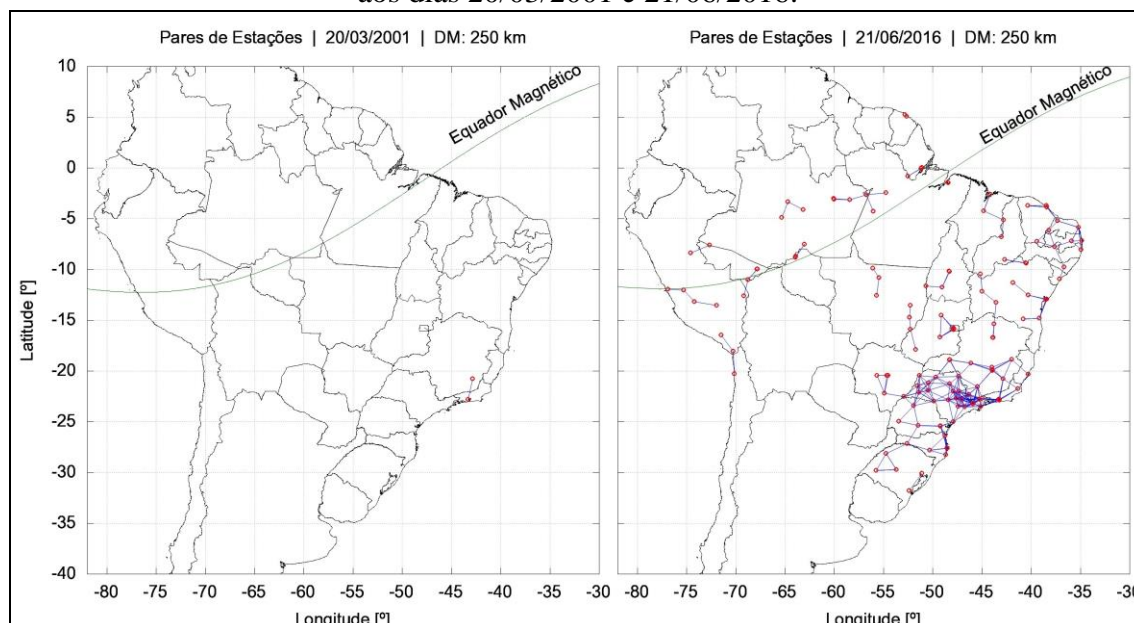
Tomando como referência o mapa do período 23h55-24h TU da Figura 90 observa-se que as irregularidades atingiram uma área ao sul do equador magnético de, aproximadamente, cinco milhões de quilômetros quadrados, com uma extensão longitudinal máxima de 3.000 km e latitudinal de 1.800 km.

6.2 Estimativa dos Parâmetros do Modelo CONUS de Risco Ionosférico para o Território Brasileiro

A estimativa geral dos parâmetros do modelo do CONUS é realizada considerando as seguintes configurações: distância máxima entre as estações de 250 km para a formação dos pares, utilização de apenas as observáveis GPS nas portadoras L1 e L2, altura média da camada ionosférica de 350 km e máscara de elevação de 10°.

A respeito do número de pares de estações formados destaca-se para a escassez de estações durante os anos de 2000 a 2007, o que acarretou em dias com apenas um par formado, conforme apresenta a Figura 91 para o caso de 20 de março de 2001. Com o passar dos anos e, conseqüentemente, com o aumento gradativo do número de estações das redes ativas, a formação dos pares atingiu um valor de 348 para o dia 21 de junho de 2016 (Figura 91).

Figura 91 – Pares de estações para a estimativa geral dos parâmetros do modelo, referentes aos dias 20/03/2001 e 21/06/2016.



As Figuras 92 a 102 apresentam os resultados finais das estimativas considerando todo o território nacional. Os gradientes foram obtidos utilizando tanto as medidas de pseudodistância filtrada, apresentadas sempre no lado esquerdo das figuras, quanto a partir de medidas de fase da portadora, apresentadas sempre no lado direito. Na Figura 92 a linha dourada representa o limite do *CONUS Threat Model*.

Figura 92 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

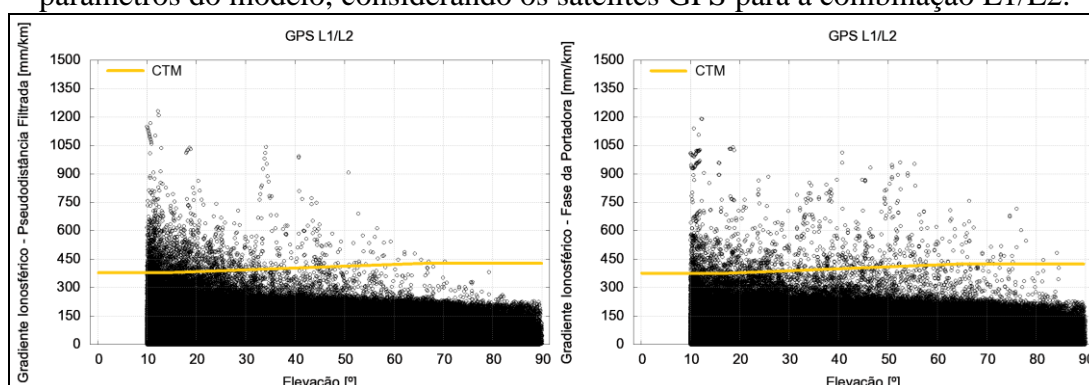


Figura 93 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

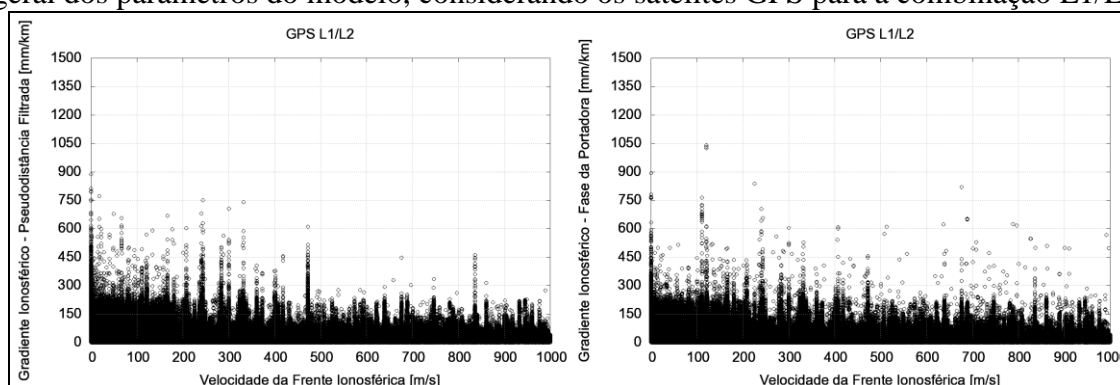


Figura 94 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

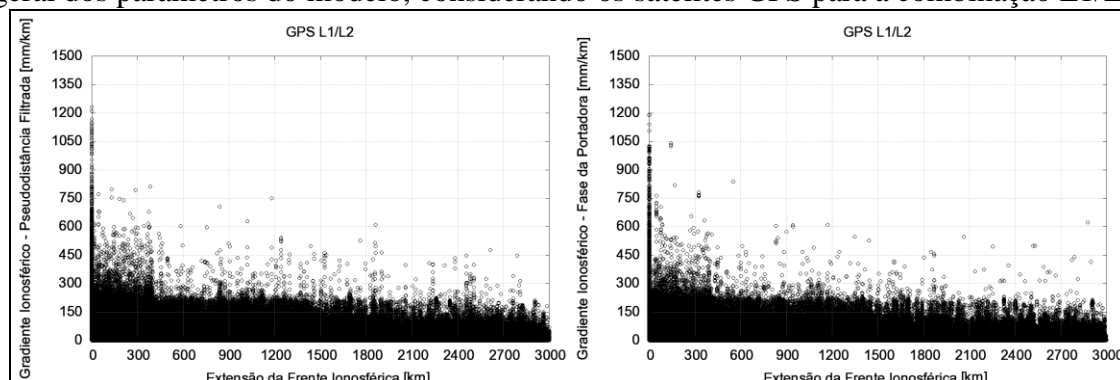


Figura 95 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

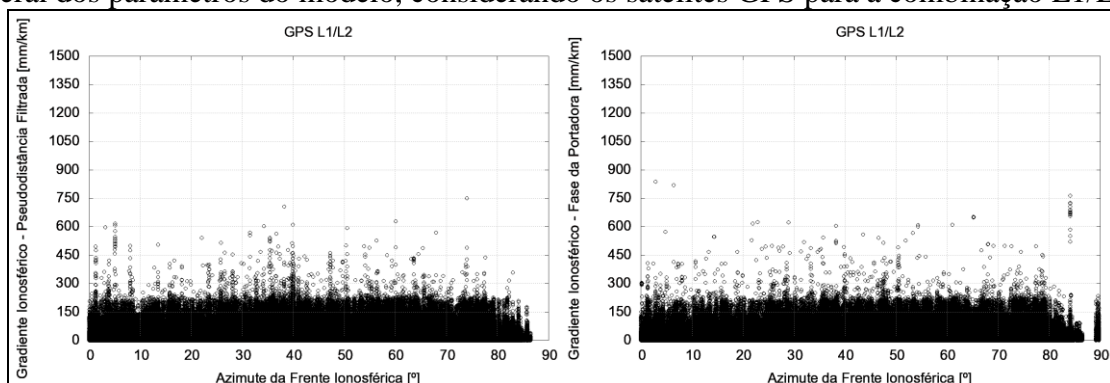


Figura 96 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

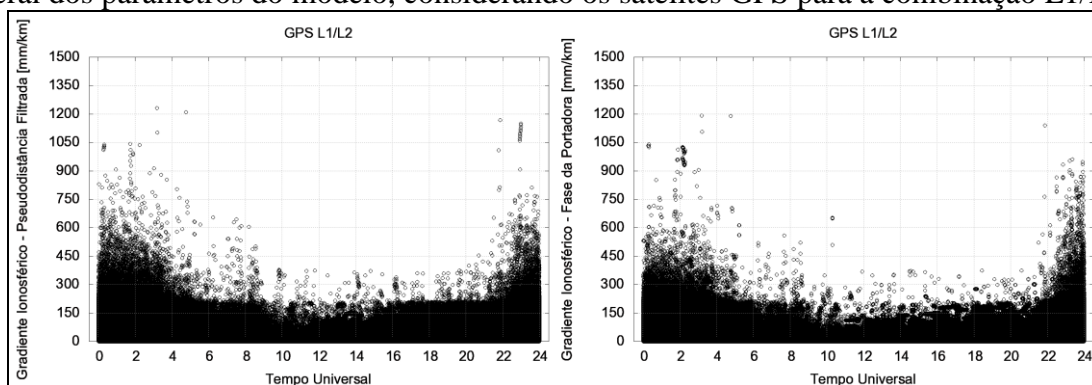


Figura 97 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

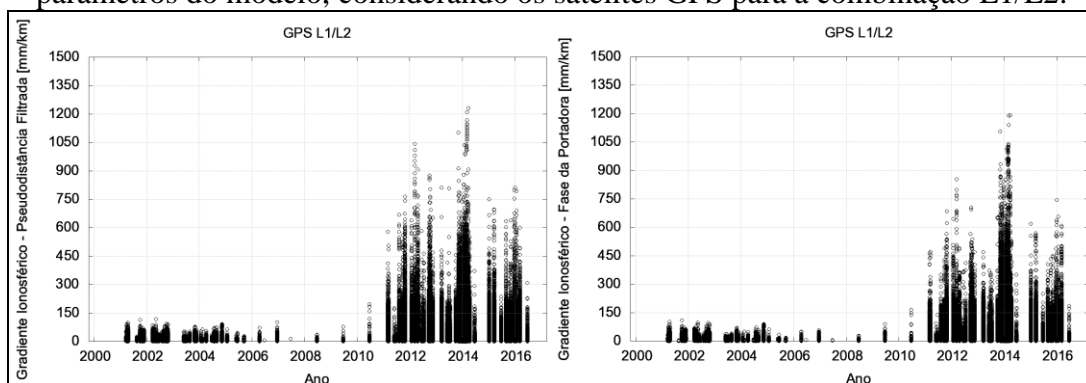


Figura 98 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

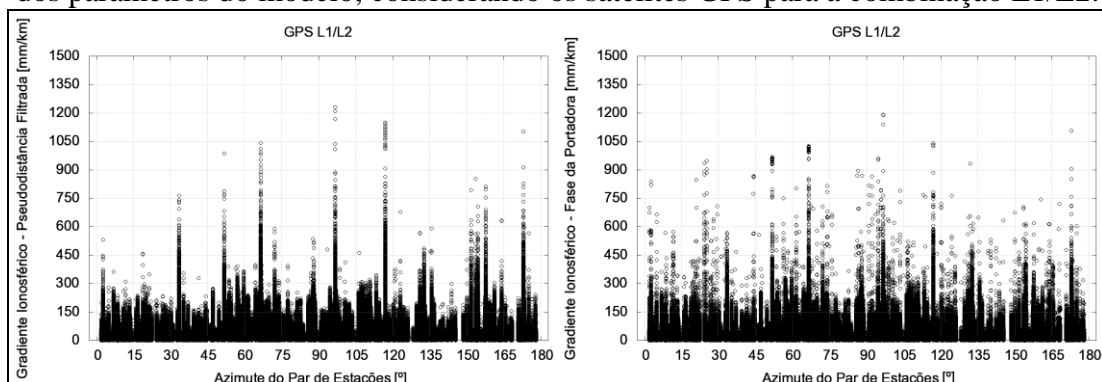


Figura 99 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

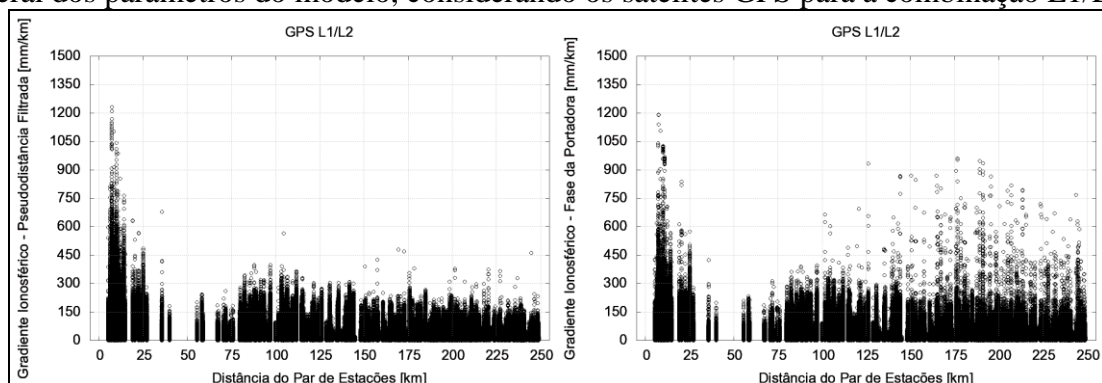


Figura 100 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

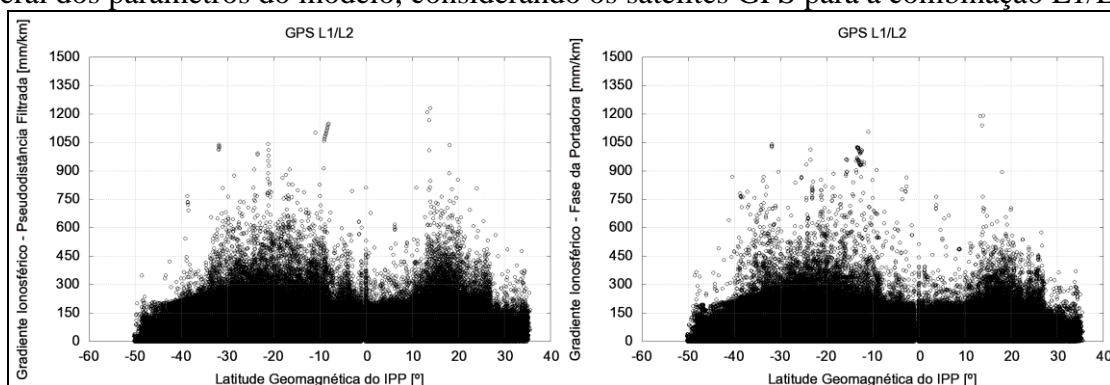


Figura 101 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

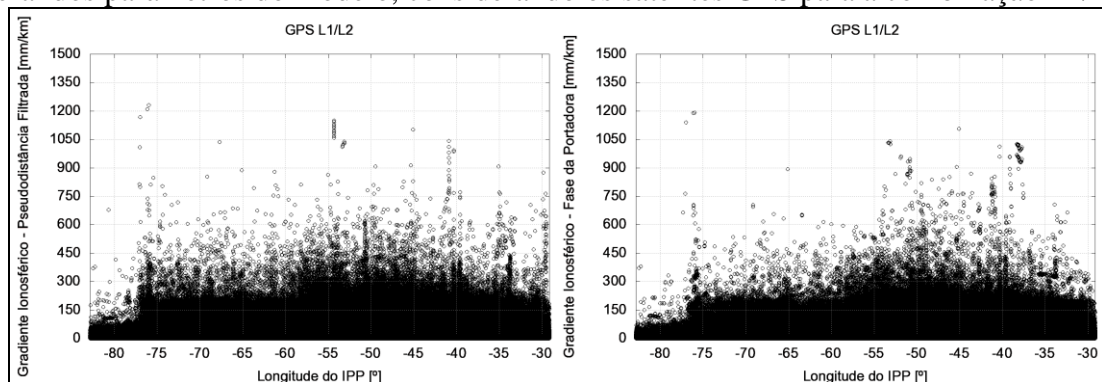
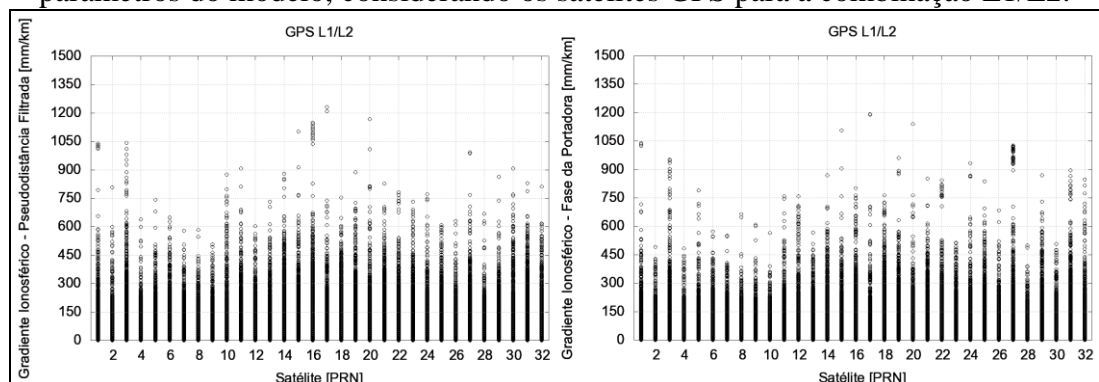


Figura 102 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.



Os valores dos parâmetros considerados como referência são os oriundos das medidas de fase. O intuito da determinação a partir de medidas de pseudodistância filtrada é no sentido de comparar se os resultados são equivalentes com as medidas de fase, de forma a analisar se os parâmetros do modelo de risco também podem ser estimados a partir de medidas dessa natureza.

Analisando os gradientes ionosféricos em função da elevação dos satélites (Figura 92) nota-se, claramente, que os valores obtidos a partir da pseudodistância filtrada e da fase para o território brasileiro superam o limite do *CONUS Threat Model* em qualquer valor de elevação, o que inviabiliza, em um primeiro momento, a utilização do GBAS no Brasil. Para fins de exemplificação são apresentados nas Tabelas 18 e 19 os dez maiores gradientes ionosféricos obtidos a partir da pseudodistância filtrada e da fase da portadora, respectivamente, bem como o DOY e o ano de ocorrência dos gradientes, os pares de estações que determinaram os gradientes, as distâncias e os azimutes dos pares, os satélites e suas elevações, e os horários.

Tabela 18 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2014-086	LRBR-RIOB	7,309	96,760	17	3,183	1.231,956	12,208
2014-062	LRBR-RIOB	7,309	96,760	17	4,766	1.210,142	12,339
2014-065	LRBR-RIOB	7,309	96,760	20	21,858	1.168,423	10,668
2014-063	MGUB-UBER	7,209	117,055	16	22,991	1.149,206	10,039
2014-063	MGUB-UBER	7,209	117,055	16	22,983	1.141,651	10,138
2014-063	MGUB-UBER	7,209	117,055	16	22,975	1.129,979	10,238
2014-063	MGUB-UBER	7,209	117,055	16	22,966	1.119,428	10,338
2014-063	MGUB-UBER	7,209	117,055	16	22,958	1.109,645	10,438
2013-312	LSTM-PAST	8,516	172,963	15	3,200	1.102,568	11,682
2014-063	MGUB-UBER	7,209	117,055	16	22,950	1.098,171	10,539

Tabela 19 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2014-086	LRBR-RIOB	7,309	96,760	17	3,183	1.191,059	12,208
2014-062	LRBR-RIOB	7,309	96,760	17	4,766	1.189,203	12,339
2014-065	LRBR-RIOB	7,309	96,760	20	21,858	1.139,474	10,668
2013-312	LSTM-PAST	8,516	172,963	15	3,200	1.106,944	11,682
2014-058	MGUB-UBER	7,209	117,055	01	0,316	1.039,663	18,634
2014-058	MGUB-UBER	7,209	117,055	01	0,300	1.032,458	18,273
2014-058	MGUB-UBER	7,209	117,055	01	0,283	1.031,881	17,913
2014-058	MGUB-UBER	7,209	117,055	01	0,291	1.031,594	18,093
2014-056	SAVO-SSA1	9,966	66,495	27	2,141	1.027,431	11,901
2014-058	MGUB-UBER	7,209	117,055	01	0,325	1.024,017	18,815

A partir dos valores obtidos destacam-se:

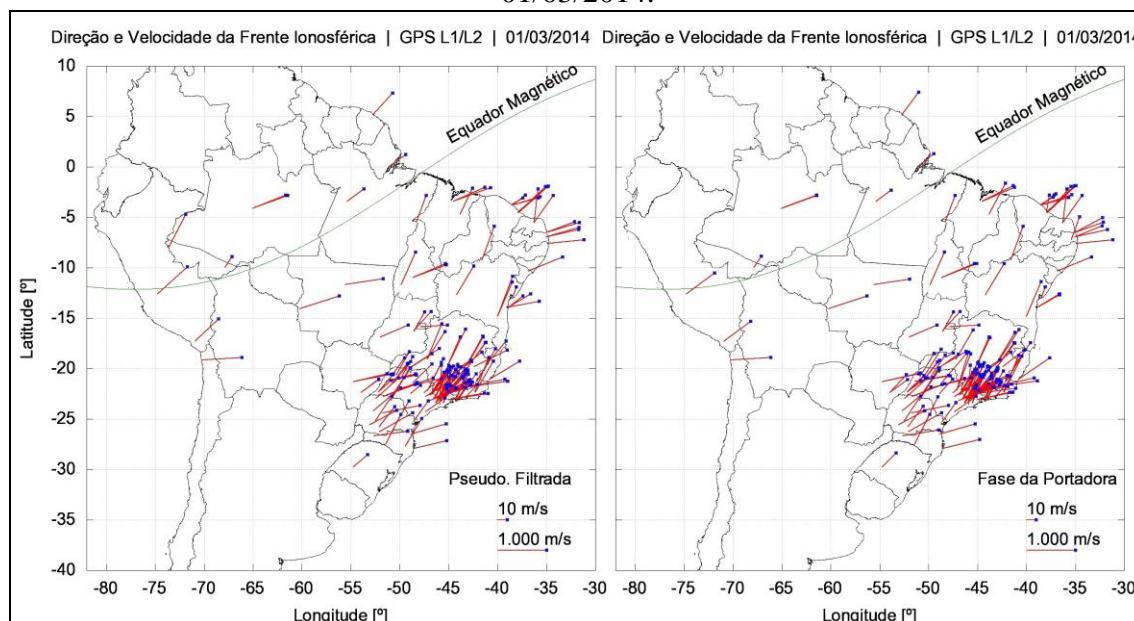
- A magnitude dos gradientes próxima a 1.200 mm/km;
- Dos dez maiores gradientes a maioria é proveniente do par MGUB-UBER, localizado na região da crista sul da AIE;
- Os instantes de ocorrência dos maiores gradientes condizem com os horários de atuação das irregularidades ionosféricas;
- Os maiores gradientes são determinados durante o período do ciclo solar 24, devido a maior quantidade de estações das redes ativas e as menores distâncias entre as estações para compor os pares, da ordem de dezenas de quilômetros; e
- Todos os gradientes das Tabelas 18 e 19, com exceção do gradiente do par SAVO-SSA1, foram classificados como não validados na etapa da validação automática final, entretanto, os mesmos foram validados manualmente, conforme o procedimento apresentado na seção 5.1.

Em relação à velocidade e extensão da frente ionosférica, conforme apresentam as Figuras 93 e 94, respectivamente, tem-se que os valores são semelhantes tanto a partir da pseudodistância filtrada quanto a partir da fase da portadora. Desconsiderando os gradientes inferiores ao limiar de 100 mm/km (DATTA-BARUA et al., 2010) é obtido para a velocidade uma variação de 0 a 990 m/s a partir dos gradientes estimados com medidas de fase, e uma variação de 0 a 980 m/s quando se faz uso dos gradientes provenientes da pseudodistância filtrada. A extensão, por sua vez, oscila em torno de 3.000 km. Porém, tais valores não podem ser considerados corretos, devido à dinâmica das bolhas ionosféricas sobre o Brasil não apresentar características dessas magnitudes. Uma provável justificativa está no fato que foram utilizados todos os pares de estações formados para a determinação dos instantes de máximo e de mínimo do atraso ionosférico, independente da orientação das estações, ou seja, não foram utilizados apenas os pares de estações dispostos nas direções de propagação das frentes ionosféricas.

Os maiores gradientes ionosféricos ocorrem quando o azimute de deslocamento da frente ionosférica é da ordem de 30° a 80°, de oeste para leste (Figura 95), valores esses que coincidem com o deslocamento das bolhas ionosféricas, paralelo ao equador magnético. Tal fato pode ser observado a partir dos mapas de vetores que indicam o

comportamento da frente ionosférica, conforme apresenta, por exemplo, a Figura 103 referente ao dia 1 de março de 2014 (outono do ápice do ciclo solar 24).

Figura 103 – Mapas de direção e velocidade da frente para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.



Analisando os horários de ocorrência dos gradientes (Figura 96) verifica-se que há uma maior concentração de altos valores, acima de 425 mm/km, justamente durante o período de atuação das irregularidades, das 22h às 5h TU. Entretanto, alguns valores acima do limite do modelo do CONUS também são identificados durante o restante do dia.

Relacionando os gradientes ionosféricos com os anos das datas utilizadas no processamento, dada pela Figura 97, nota-se que a concentração dos maiores valores ocorre principalmente durante o ciclo solar 24 (com destaque para o ápice em 2014), embora a intensidade das irregularidades ionosféricas tenham sido mais forte durante o ciclo 23, conforme apresentado na seção 6.1. Esse resultado se deve a uma maior implantação de estações a partir de 2010 que, com o passar dos anos, se aproxima de 250 estações no território brasileiro, contribuindo assim para a formação de pares com distâncias inferiores a 100 km. A Figura 99 mostra que quanto menor for a distância entre as estações (até 25 km), maior são os gradientes ionosféricos, traduzindo em uma melhor determinação dos gradientes, no sentido de ser mais fidedigna a relação entre os pares de estações com a estação GBAS e a aeronave na fase de aproximação.

Uma vez que as irregularidades ionosféricas (bolhas) se deslocam sobre o território brasileiro ao sul e ao norte do equador magnético no sentido oeste-leste, ou mais precisamente no sentido sudoeste-nordeste, espera-se que haja uma concentração de altos gradientes provenientes de pares de estações cujas orientações sejam nesse sentido, ou seja, azimutes aproximadamente entre 30° e 120° . Observando a Figura 98 tem-se que esse comportamento ocorre de fato, sendo os maiores gradientes estimados por pares cujos azimutes são em torno de 90° .

As Figuras 100 e 101 mostram que a concentração de gradientes está relacionada com a AIE na região equatorial e de baixas latitudes, sendo os maiores valores obtidos para as cristas sul e norte da anomalia. Observa-se que na região de médias latitudes não há a ocorrência de elevados gradientes, bem como que há uma diminuição dos valores próximos ao equador magnético. As figuras servem também para mostrar que há uma maior concentração de estações na região Sudeste, entre as latitudes geomagnéticas -35° e -10° e as longitudes geográficas -55° e -40° , do que nas demais regiões, como a região amazônica, por exemplo, localizada entre as longitudes -75° e -60° .

Por fim, em relação aos satélites GPS, conforme apresenta a Figura 102, nota-se que para as medidas de fase os satélites de PRN 1, 3, 15, 17, 19, 20 e 27 são os que determinam os maiores gradientes. Entretanto, com base no comportamento dos valores, nenhuma conclusão pode ser obtida a respeito de que esses satélites são os mais propícios a terem seus sinais afetados pela frente ionosférica.

Embora prevista apenas para a estimativa dos parâmetros local-temporais dos aeroportos, são apresentadas nas Figuras 104 a 107 a variação sazonal de alguns resultados finais (elevação, tempo universal, latitude geomagnética e longitude geográfica dos IPP), sendo em preto os resultados referentes ao outono, em azul ao inverno, em verde a primavera e em vermelho ao verão. Ressalta-se que os gráficos do lado esquerdo das figuras correspondem aos gradientes obtidos com medidas de pseudodistância filtrada e do lado direito os gradientes provenientes das medidas de fase.

Figura 104 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

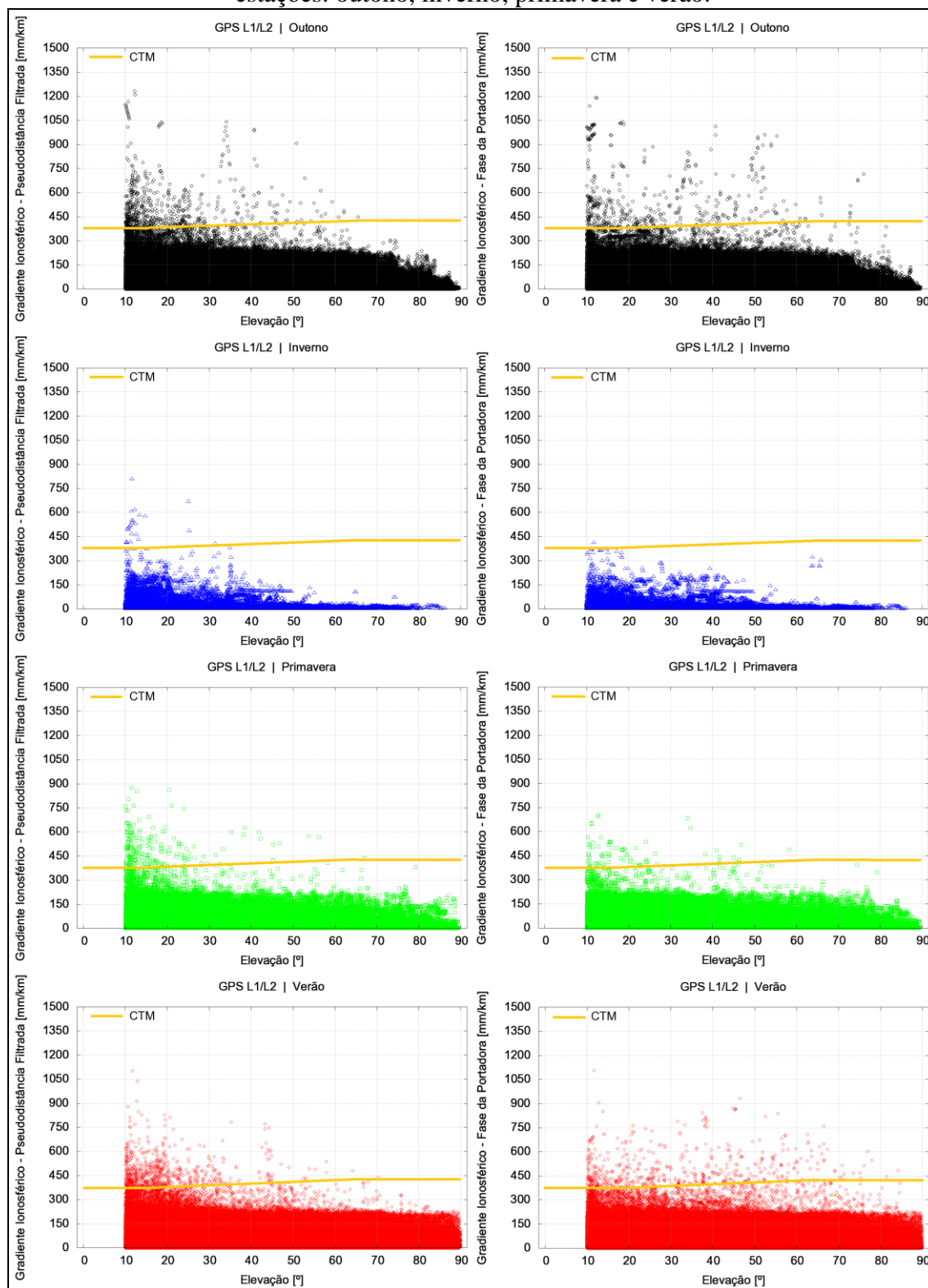


Figura 105 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

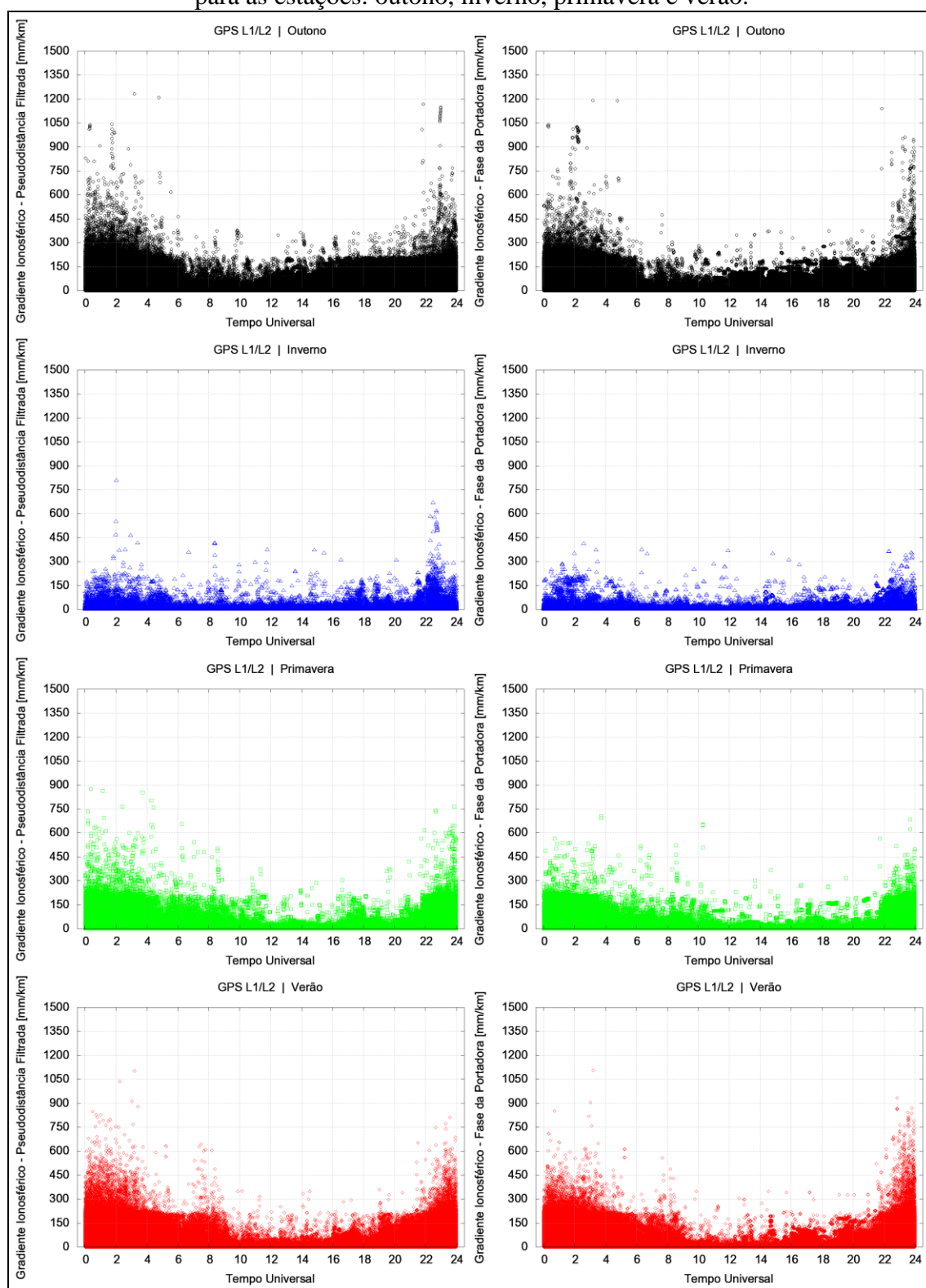


Figura 106 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

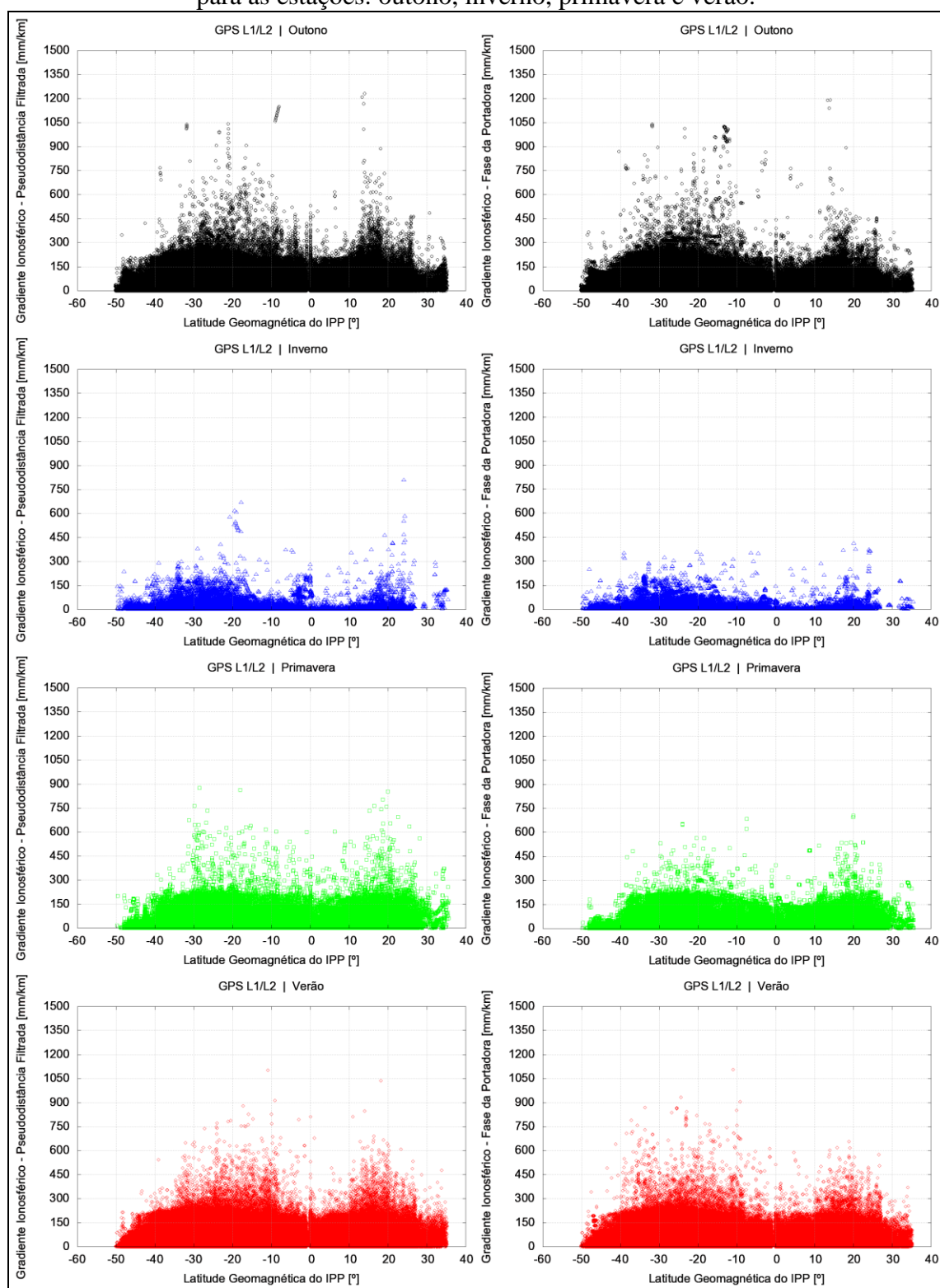
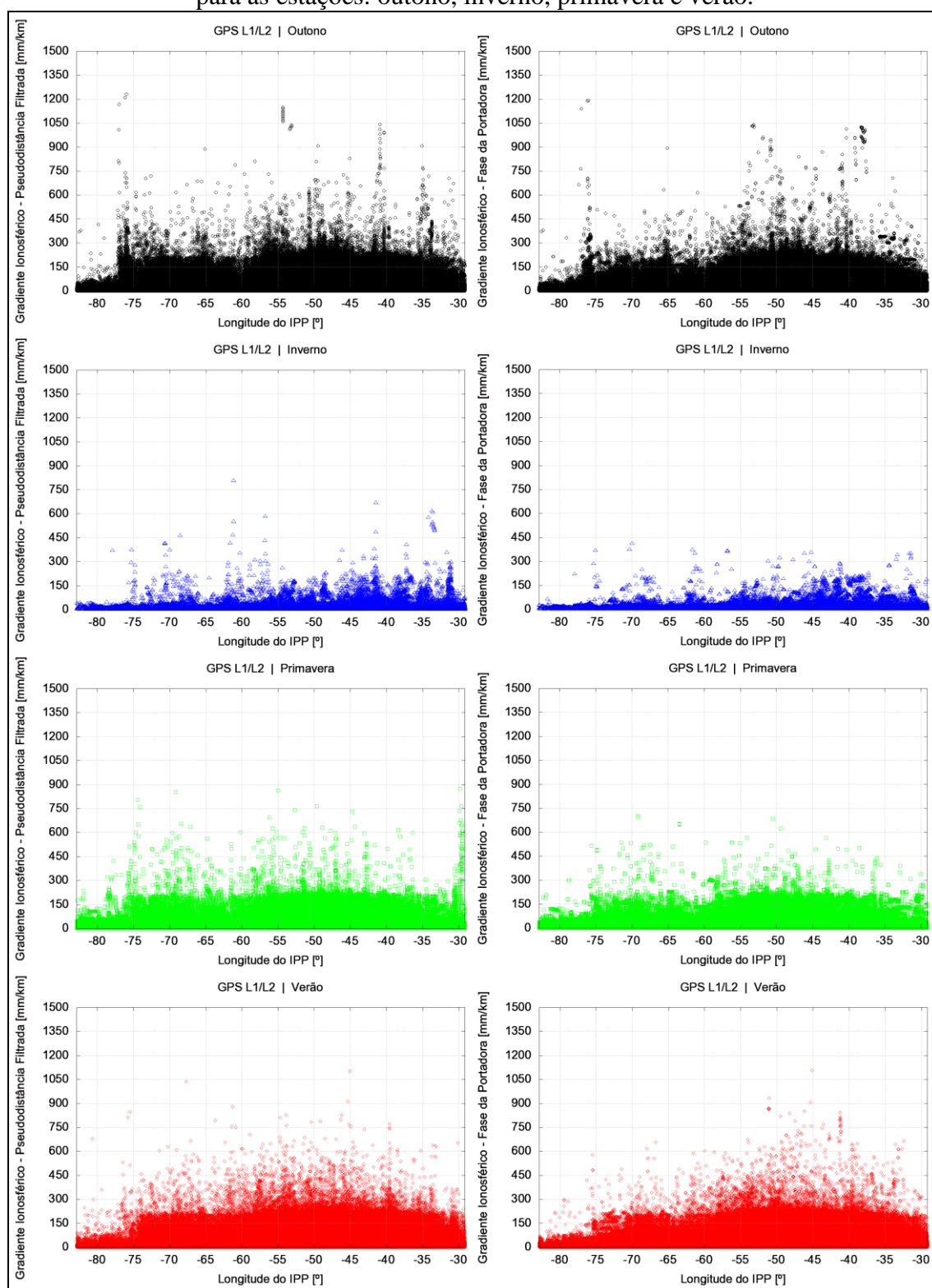


Figura 107 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.



Analisando cada estação do ano pode-se concluir que a provável inviabilidade da aplicação do GBAS no Brasil, considerando o território nacional como um todo, é devido aos gradientes obtidos essencialmente durante o outono, a primavera e o verão, para o período das 22h às 5h TU e para as regiões de latitudes geomagnéticas entre 10° e 20° e entre -40° e -10° , bem como, de longitudes entre -60° e -35° , conforme mostram as Figuras 104 a 107. Durante o período do inverno, com exceção da elevação compreendida entre 10° e 30° (Figura 104), os gradientes estimados satisfazem os limites estabelecidos pelo *CONUS Threat Model*; entretanto ressalta-se a ocorrência de elevados gradientes, da ordem de 600 mm/km, para as medidas de pseudodistância filtrada.

Uma observação a ser realizada é para a equivalência dos parâmetros obtidos a partir da pseudodistância filtrada com os provenientes da fase da portadora, indicando que para esse cenário indefere a escolha de qual medida pode ser adotada.

Uma vez estimado os parâmetros gerais, bem como os parâmetros para cada estação do ano, foram obtidos a média (μ_{vig}), o desvio-padrão (σ_{vig}) e o desvio-padrão inflacionado ($\sigma_{\text{vig_infla}}$) dos gradientes ionosféricos verticais para cada satélite GPS (L1/L2), para cada bloco de distância entre as estações do par (0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km) e para cada dia de dados processado. Com o intuito de exemplificar os resultados determinados, são apresentados nas Figuras 108 e 109 apenas os valores obtidos para o verão do ápice do ciclo solar 23 e para o outono do ciclo solar 24, que correspondem aos dias 7 de novembro de 2001 e 1 de março de 2014. Salienta-se que para a data de 2001 são mostrados apenas os valores de μ_{vig} (azul), σ_{vig} (vermelho) e $\sigma_{\text{vig_infla}}$ (verde) do bloco 200-250 km, pois há somente pares com distâncias dessa magnitude, ao passo que para o dia de 2014 são apresentados os valores para todos os blocos.

Figura 108 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e $\sigma_{\text{vig_infla}}$ para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2 do bloco 200-250 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 07/11/2001.

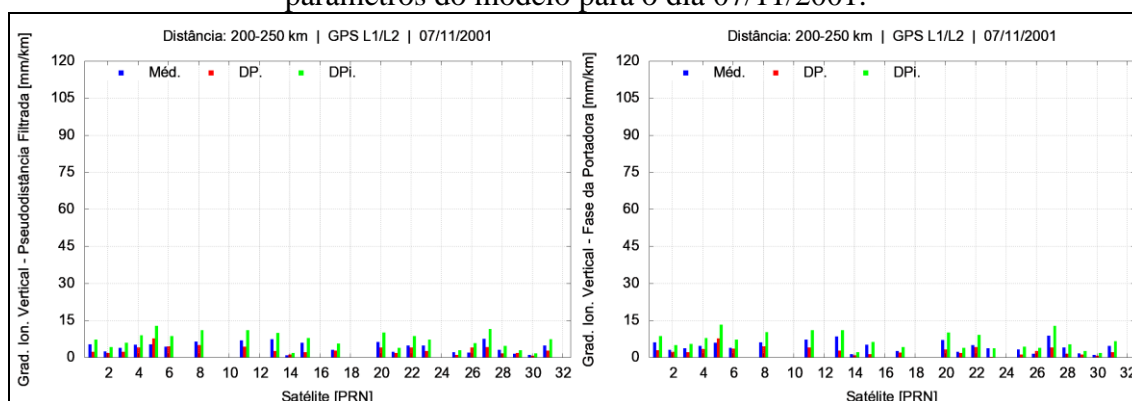


Figura 109 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2 dos blocos 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.



Apesar do ciclo solar 23 apresentar irregularidades ionosféricas mais fortes, observa-se pela Figura 108 que os valores de σ_{vig} foram inferiores ao limiar de 4 mm/km, valor esse que atende as condições ionosféricas identificadas no *CONUS Threat Model*, o qual é utilizado pelo GBAS da Honeywell. O motivo para o baixo valor de desvio-padrão obtido está na escassez de estações e no elevado comprimento das linhas das estações disponíveis para o dia, em torno de 250 km, uma vez que a maior variabilidade de gradientes verticais está restrita aos pares de estações com linhas inferiores a 100 km. Assim, os valores de σ_{vig} e $\sigma_{\text{vig_infla}}$ do dia 7 de novembro de 2001 não retratam a real variação do gradiente entre a estação de referência e a aeronave.

Para o dia 1 de março de 2014 (Figura 109) a situação é diferente. Devido ao grande número de estações disponíveis, principalmente com distâncias menores que 100 km, a determinação dos desvios-padrão proporcionou resultados plausíveis de serem analisados. Para o caso dos desvios-padrão dos gradientes verticais para o bloco 0-50 km tem-se que os valores oscilaram em torno de 20 mm/km, apresentando $\sigma_{\text{vig_infla}}$ da ordem de 40 mm/km, resultados esses bem superiores aos 4 mm/km do modelo norte-americano. Para o intervalo de 50-100 km alguns satélites também apresentaram desvios-padrão superiores a 4 mm/km. Isto evidencia a completa distinção das condições ionosféricas que atuam no território norte-americano das que agem no Brasil. São nesses dois intervalos de distâncias que as aeronaves fazem, normalmente, o uso do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical para determinar os níveis de proteção HPL e VPL. Assim, uma determinação acurada dos desvios-padrão é essencial para a segurança da aeronave.

6.3 Estimativa dos Parâmetros Local-Temporais do Modelo CONUS de Risco Ionosférico para Aeroportos Internacionais Brasileiros

A estimativa de parâmetros local-temporais tem como objetivo, primeiramente, analisar os gradientes ionosféricos em determinadas áreas do Brasil, as quais estão sujeitas a condições ionosféricas diferentes, como por exemplo, a região da crista sul da AIE, a região de médias latitudes e a região próxima ao equador magnético (onde a ionização é menos intensa). Assim, parâmetros foram obtidos para cinco aeroportos: SBGR, SBGL, SBBR, SBPA e SBRF, contemplando as três áreas supracitadas, apresentados nas subseções 6.3.1 a 6.3.5.

Estimativas locais e temporais permitem avaliar se os parâmetros obtidos atendem o limite do *CONUS Threat Model* para um determinado local e, na impossibilidade

de atendimento, indicam os prováveis períodos do ano e horários do dia que o GBAS pode ser empregado.

Para as estimativas foram consideradas as seguintes configurações iniciais: raio de busca de estações de 500 km, distância máxima para a formação dos pares de 400 km, utilização de apenas medidas nas portadoras L1 e L2 dos satélites GPS, altura média de 350 km para a camada ionosférica e máscara de elevação de 10° .

6.3.1 Aeroporto internacional de São Paulo/SP – “Cumbica” (SBGR)

Analogamente a seção anterior, são apresentados nas Figuras 110 a 122 os resultados finais para o aeroporto de Cumbica, com relação ao número de pares formados, gradientes ionosféricos, estações do ano e desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical.

Figura 110 – Pares de estações para a estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, referentes aos dias 20/03/2001 e 21/06/2016.

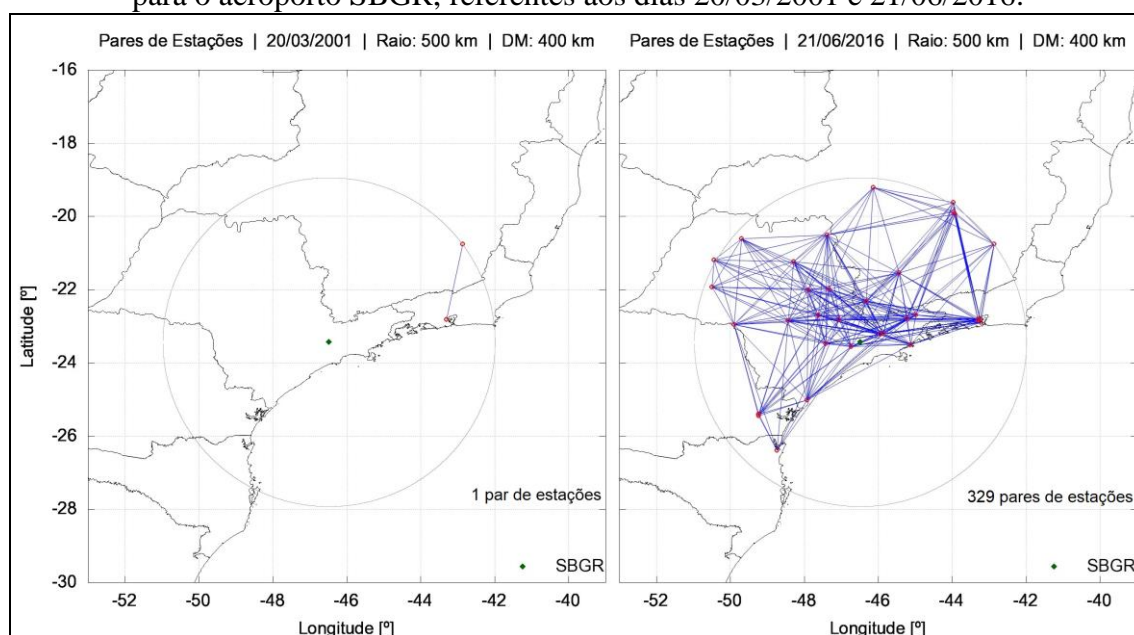


Figura 111 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

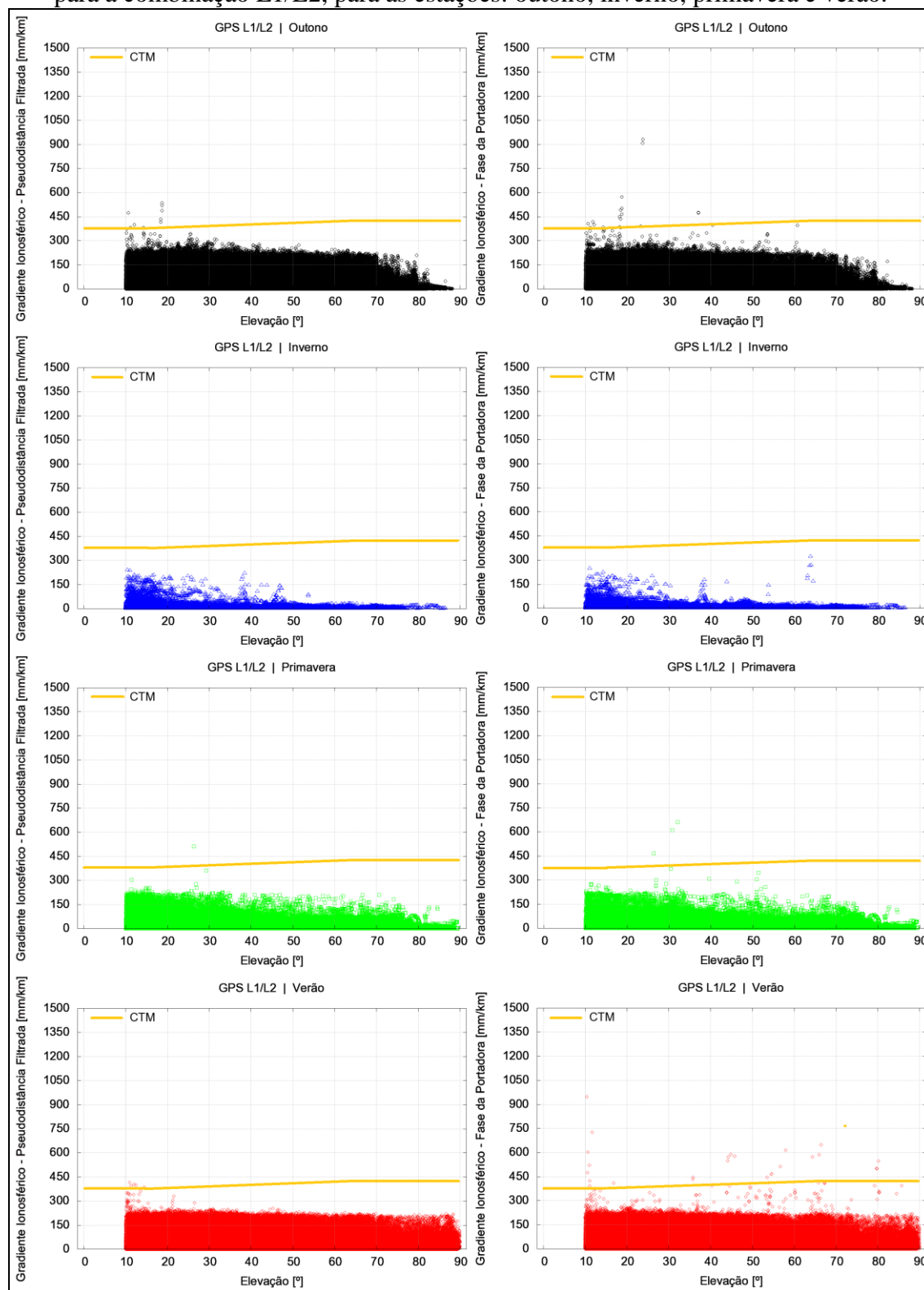


Figura 112 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

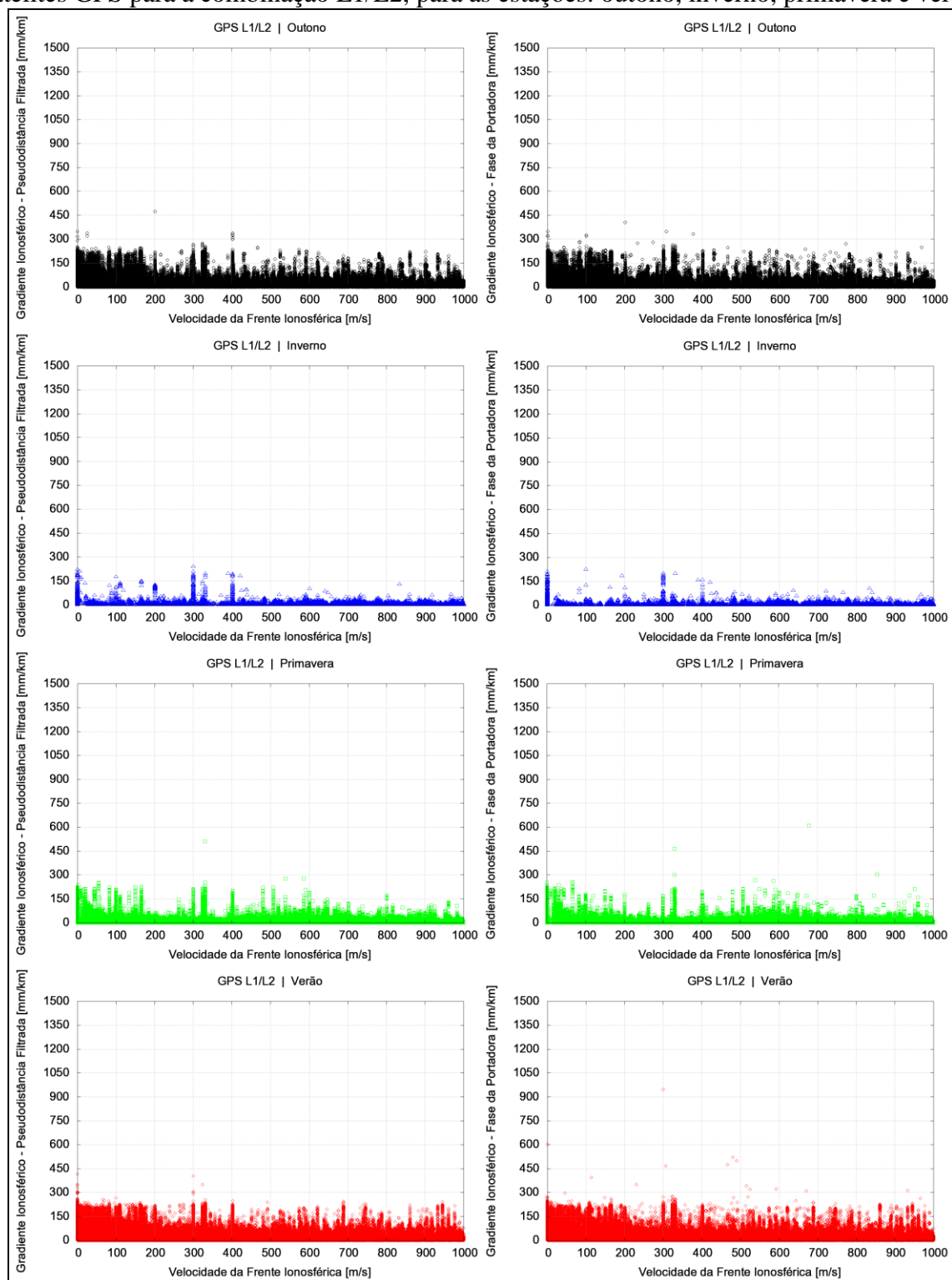


Figura 113 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

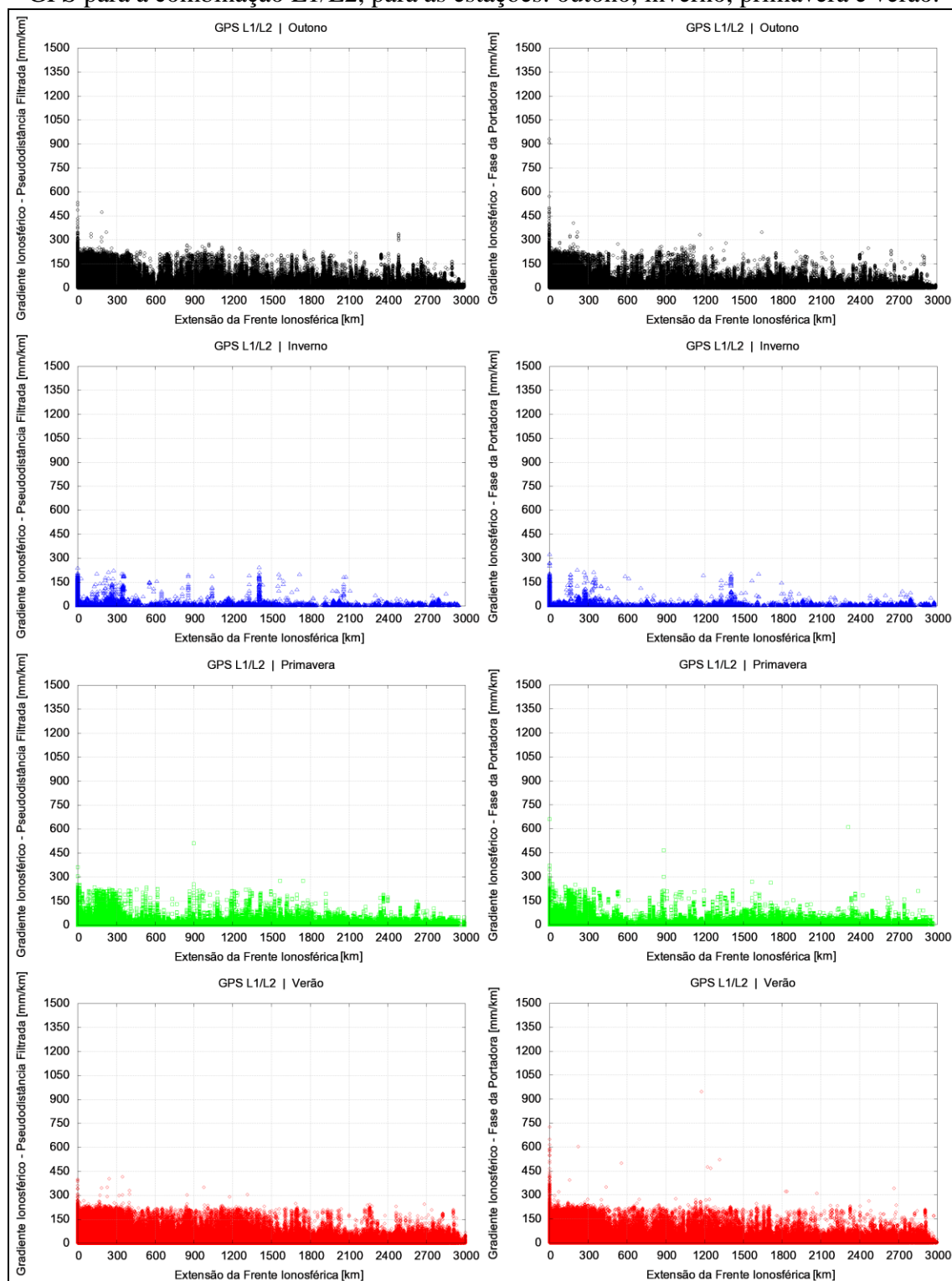


Figura 114 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

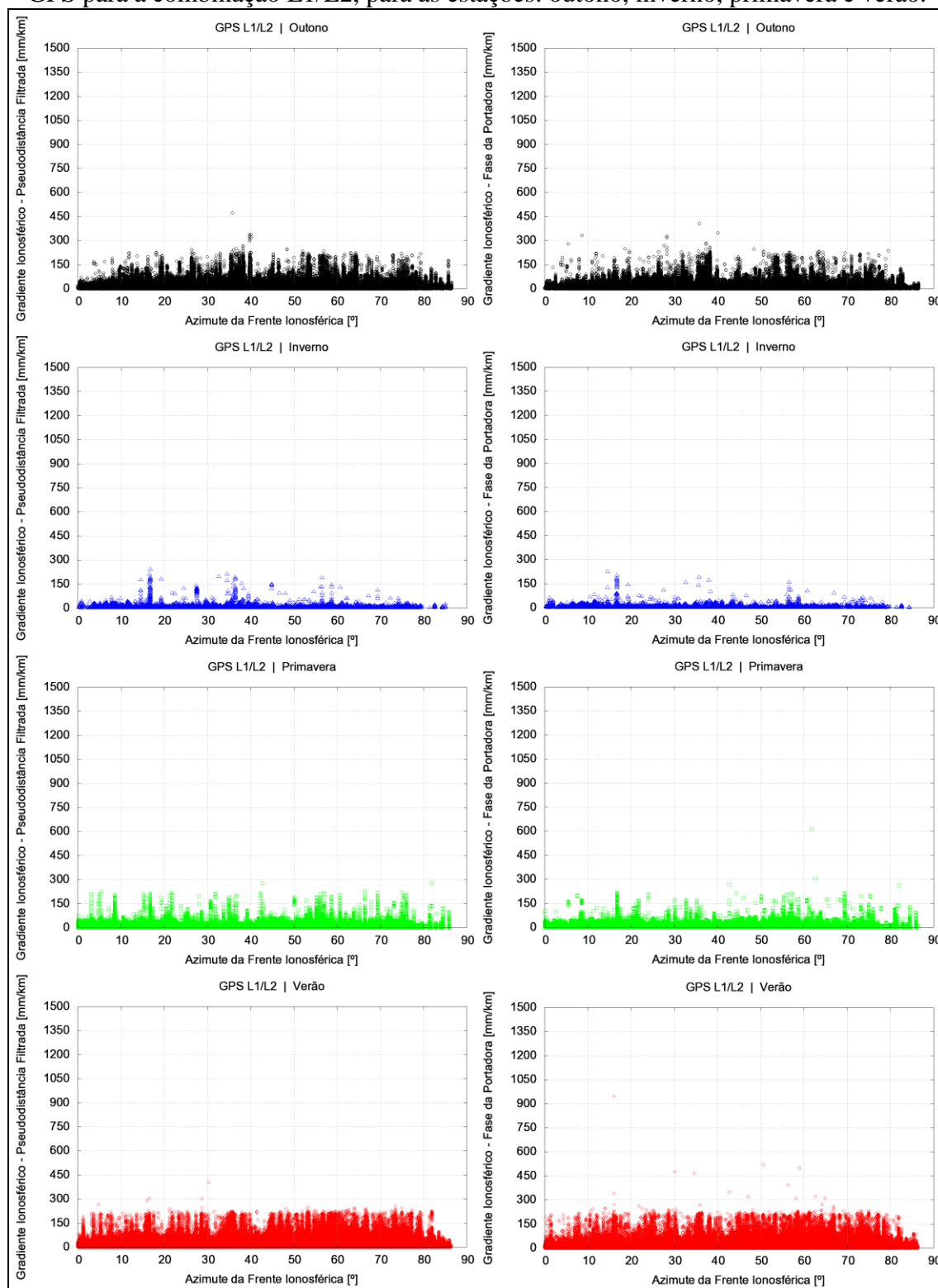


Figura 115 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

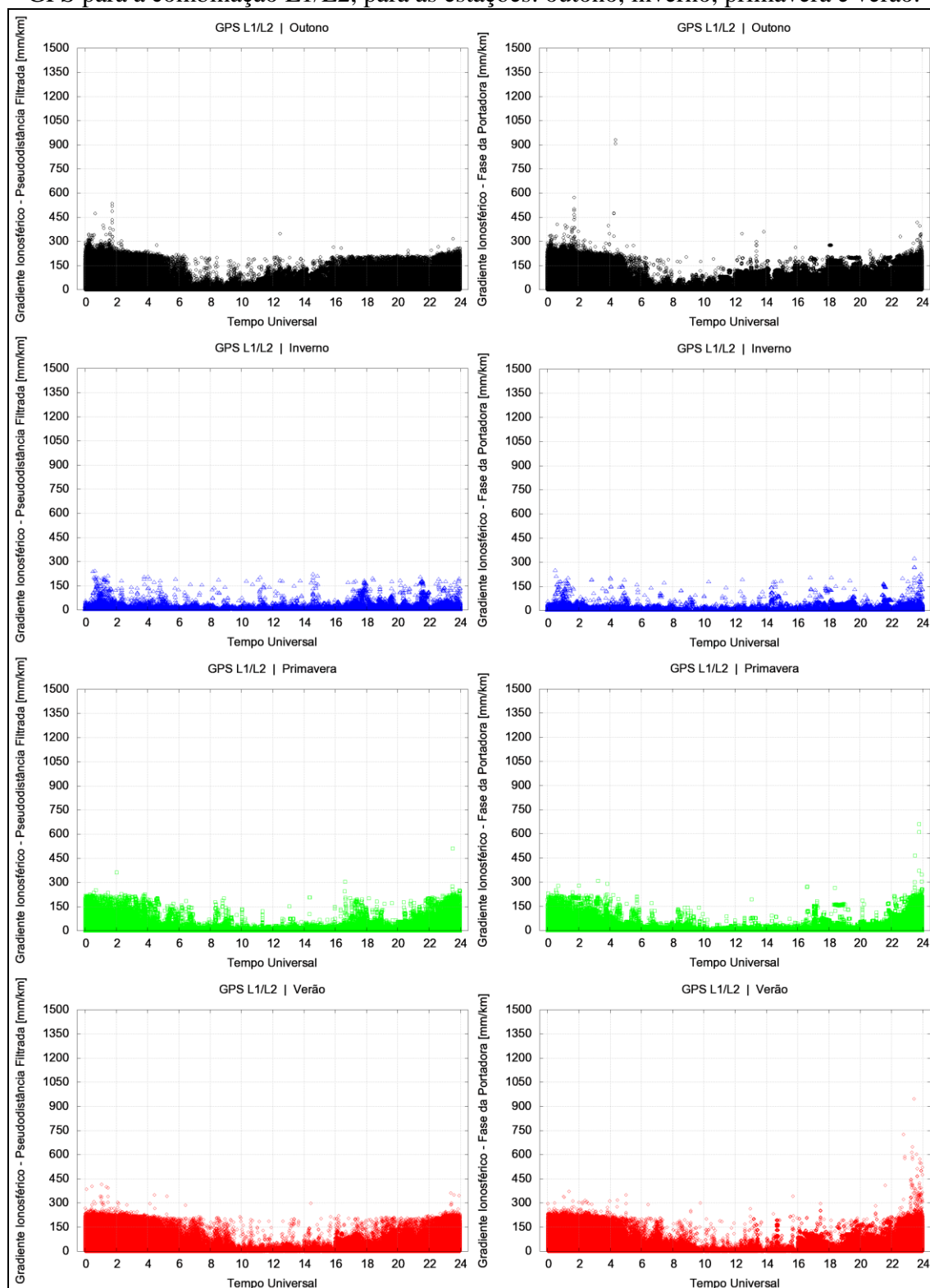


Figura 116 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

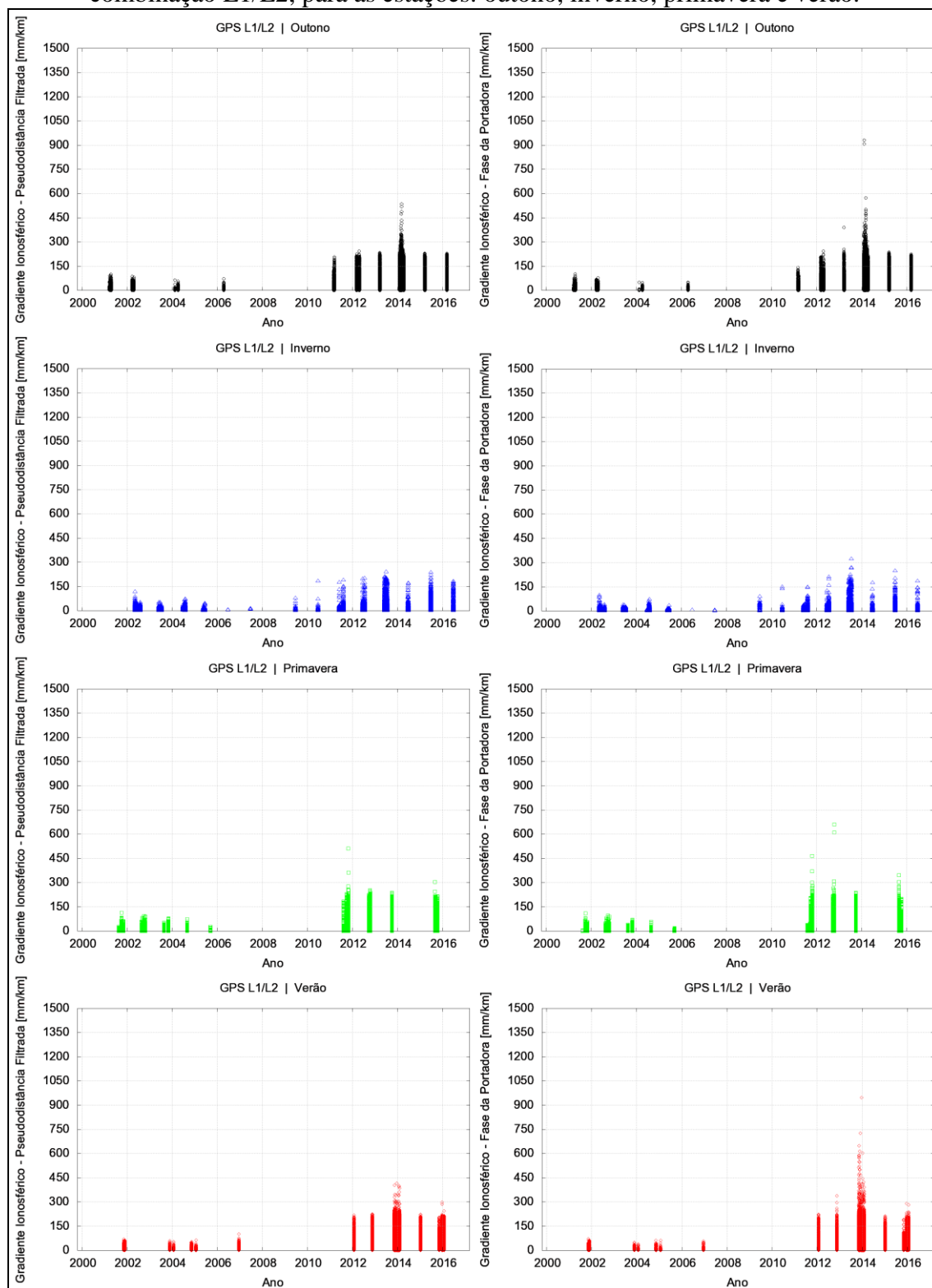


Figura 117 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

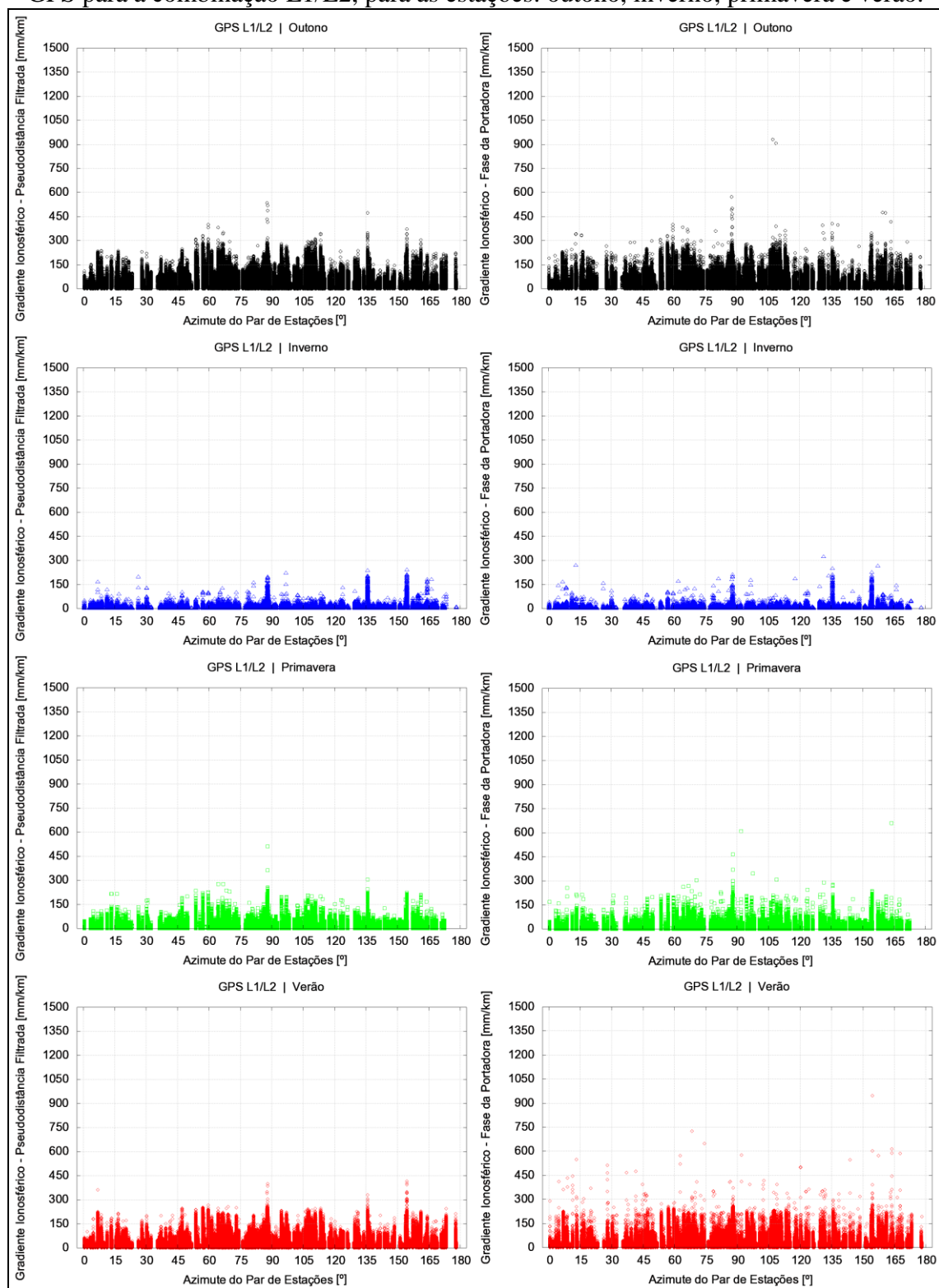


Figura 118 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

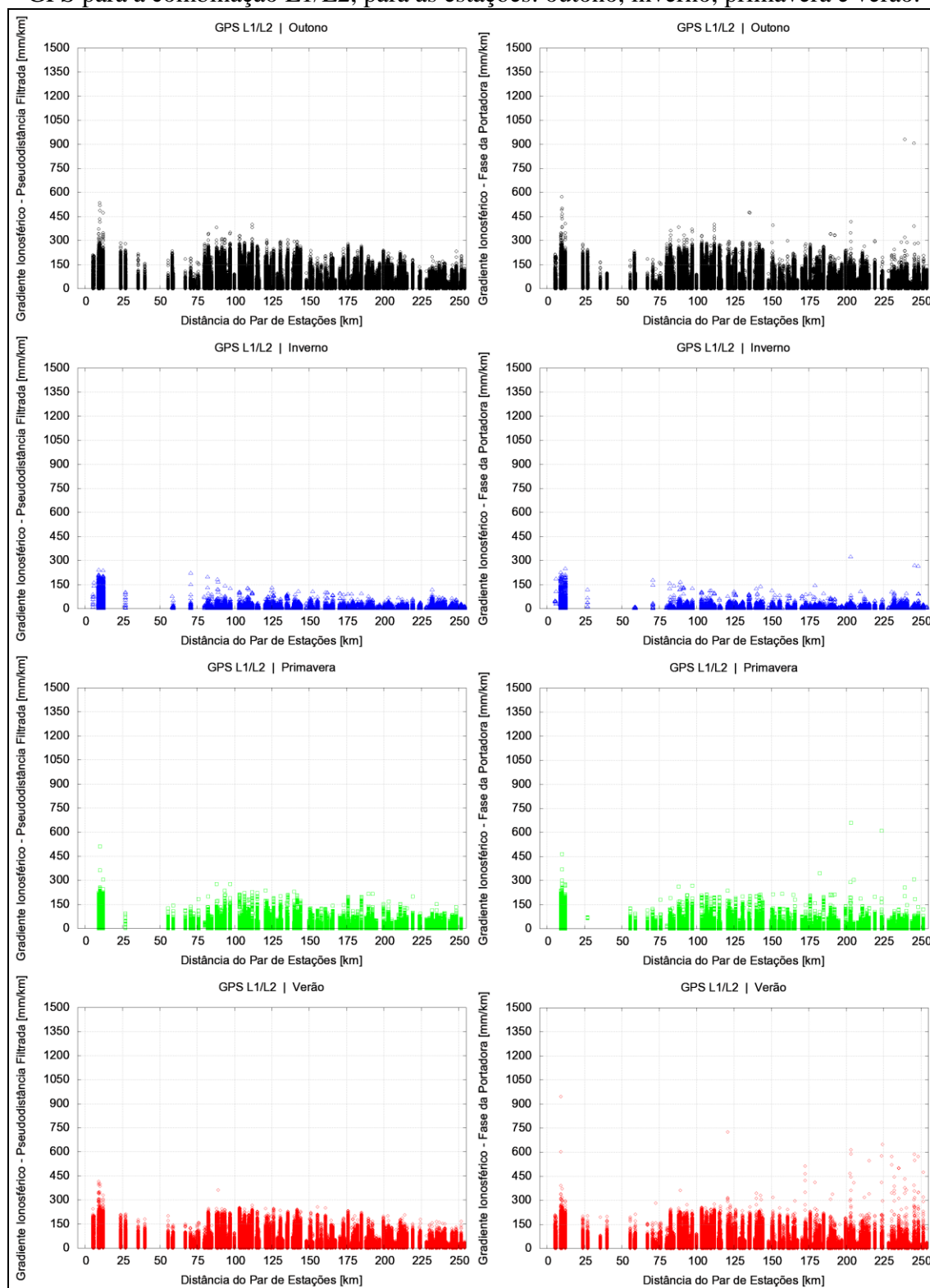


Figura 119 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

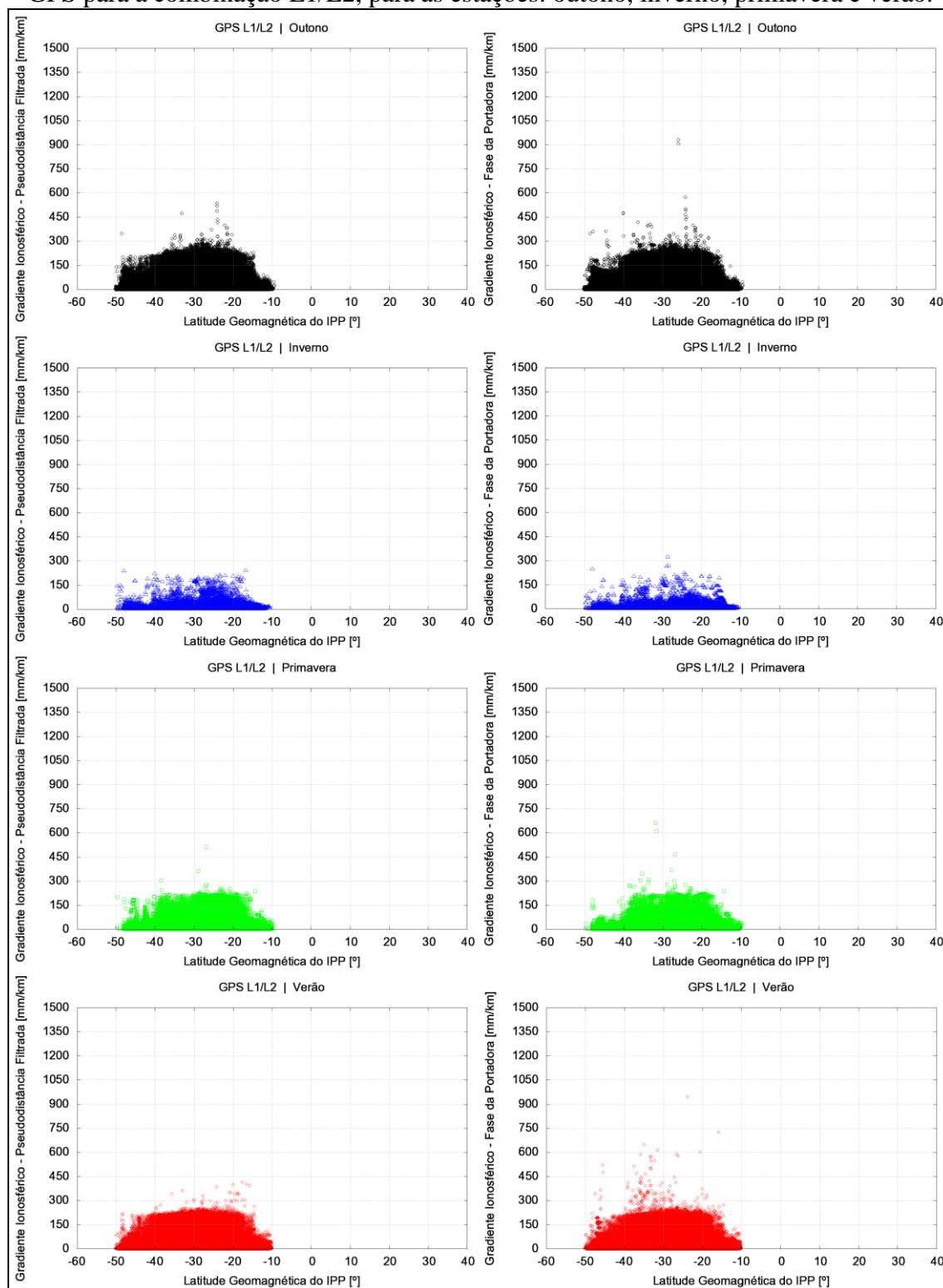


Figura 120 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

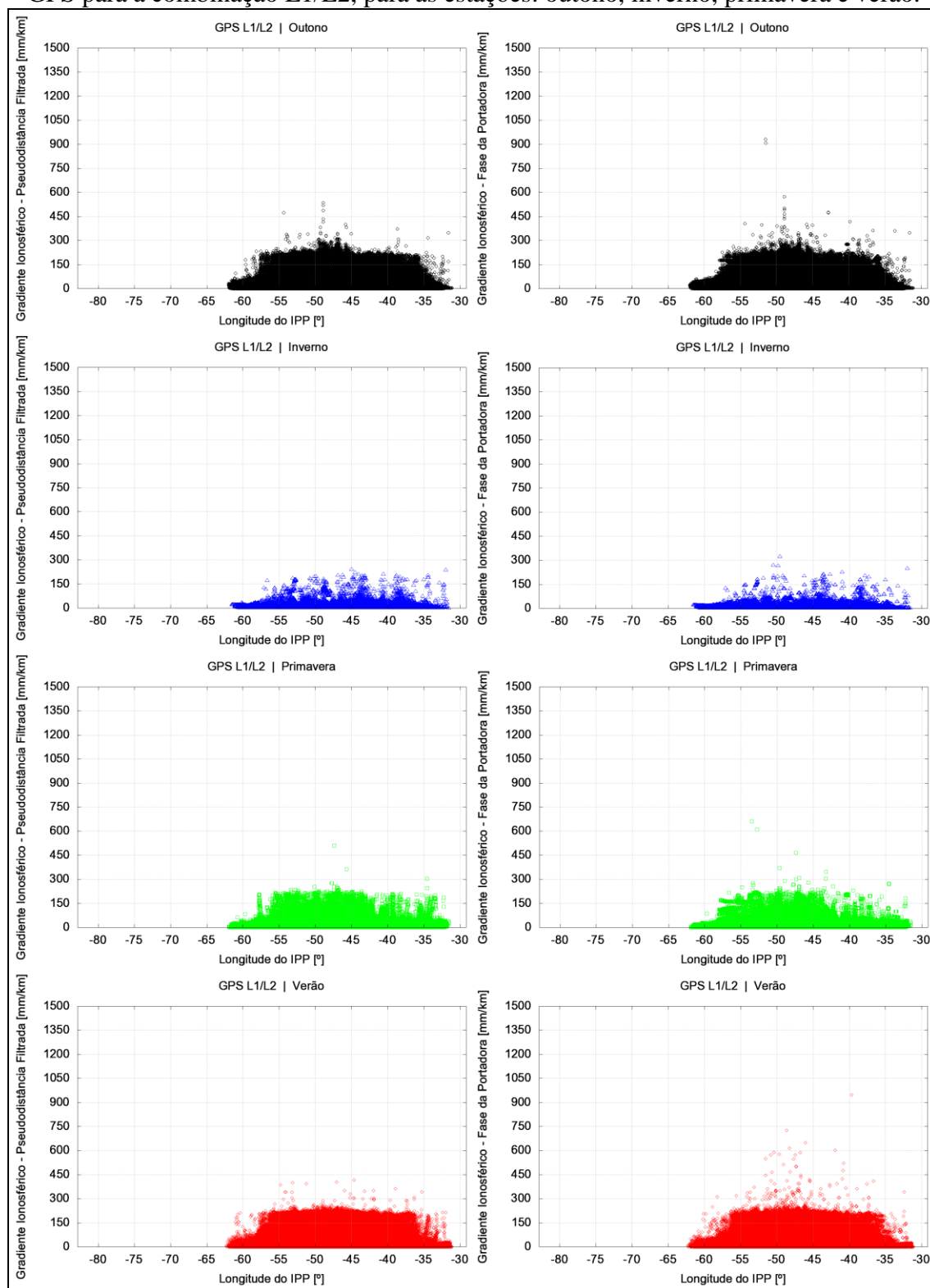


Figura 121 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

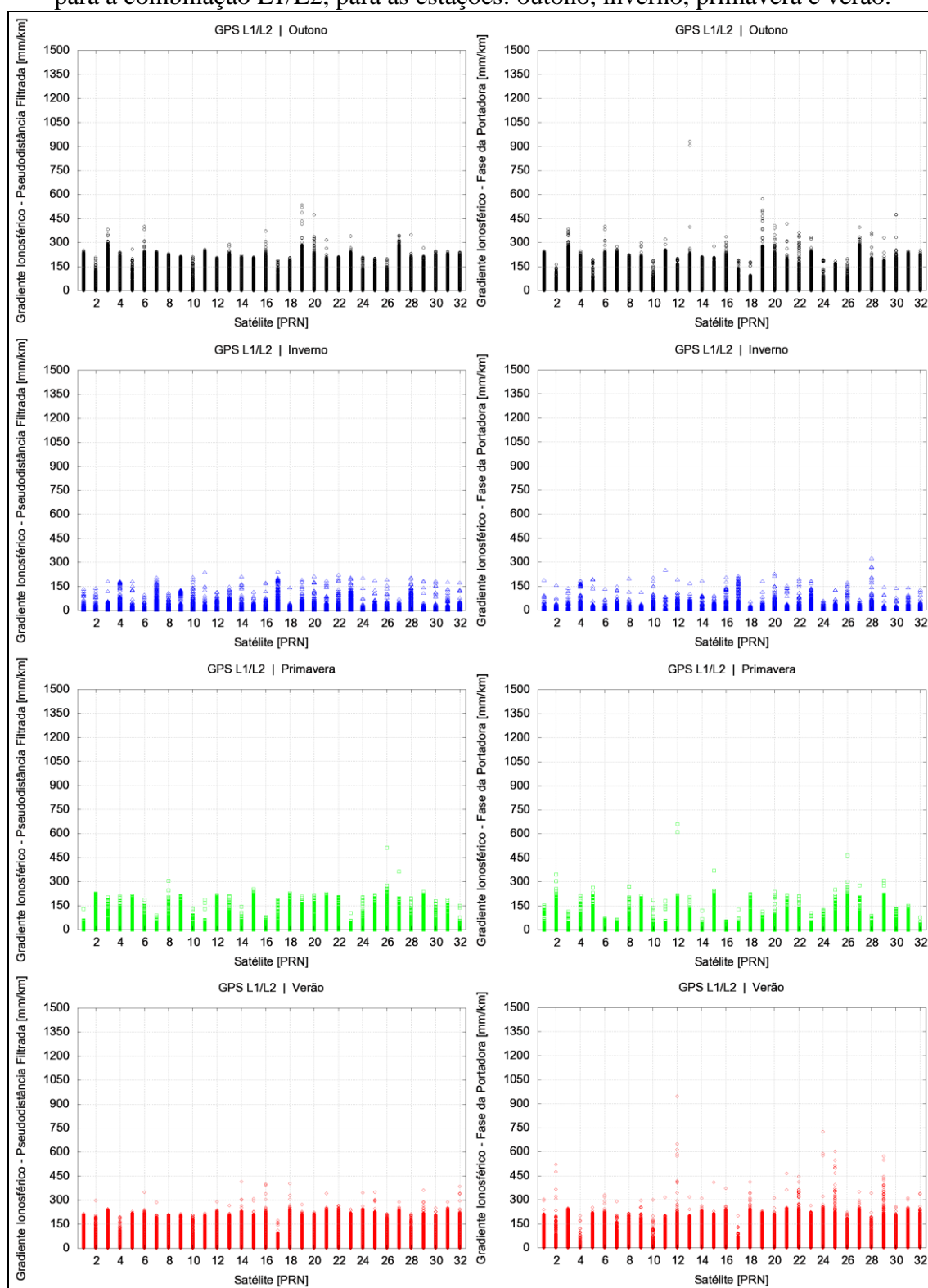
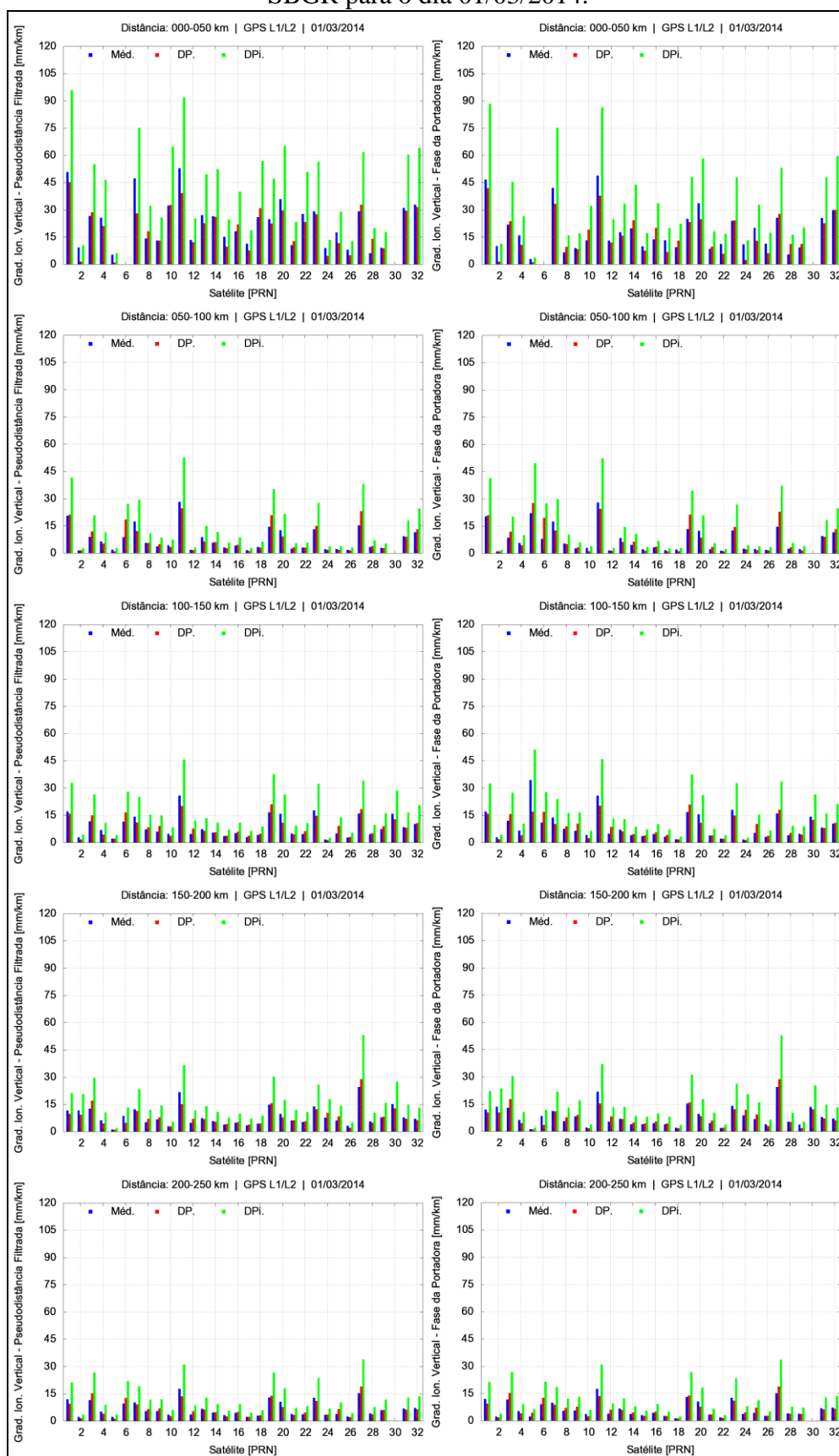


Figura 122 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2 dos blocos 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km, referentes aos pares da estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGR para o dia 01/03/2014.



Os resultados do modelo do aeroporto de Cumbica indicam que há a possibilidade da utilização do GBAS para a aproximação e pouso preciso de aeronaves, com exceção das 22h às 5h TU dos períodos de outono, primavera e verão (para o inverno não haveria restrições). Essa conclusão é obtida analisando as Figuras 111 e 115, em que se verifica que os gradientes (obtidos pela fase) superiores ao limiar de 425 mm/km do *CONUS Threat Model* concentram-se nessa janela de horário.

Observa-se pela Figura 117 uma concentração dos gradientes obtidos pelos pares com azimutes entre 45° e 110°, direção essa referente ao deslocamento das irregularidades ionosféricas e, conseqüentemente, da frente ionosférica, conforme é corroborado pelos gráficos da Figura 114.

A partir da Figura 119 nota-se que os gradientes ionosféricos estimados são oriundos da região da crista sul da Anomalia de Ionização Equatorial, localizados entre as latitudes -40° e -15°, e que a intensidade dos gradientes está relacionada com a intensidade sazonal da anomalia, sendo os menores gradientes referentes ao inverno, os gradientes moderados vinculados ao outono e primavera e os maiores valores ao verão.

A respeito dos satélites em si (Figura 121) tem-se que os PRN que proporcionam os maiores gradientes foram: 02, 03, 06, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29 e 30; em contrapartida, os demais satélites apresentaram gradientes inferiores a 425 mm/km independentemente da estação do ano.

Em se tratando dos valores de desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical para o período do outono do ápice do ciclo 24 (Figura 122) analisa-se que, para as distâncias entre 0-50 km e 50-100 km, os maiores desvios-padrão são referentes aos satélites que proporcionaram os maiores gradientes, atingindo em média 18 mm/km para o σ_{vig} e 39 mm/km para o $\sigma_{\text{vig_infla}}$. Porém, destaca-se o satélite de PRN 05, que mesmo sobre o efeito de eventos ionosféricos anômalos, proporcionou valores de σ_{vig} e $\sigma_{\text{vig_infla}}$ menores que 4 mm/km.

A investigação da usabilidade de uma estação GBAS no aeroporto internacional de São Paulo, um dos mais movimentados da América Latina, é de grande valia para o sistema operacional e de segurança do mesmo, uma vez que aproximações e pousos precisos podem ser realizados com eficácia desde que obedeçam as restrições supracitadas.

6.3.2 Aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ – “Galeão” (SBGL)

As Figuras 123 e 124 apresentam apenas os gráficos dos gradientes em função da elevação e do tempo universal, respectivamente.

Figura 123 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGL, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

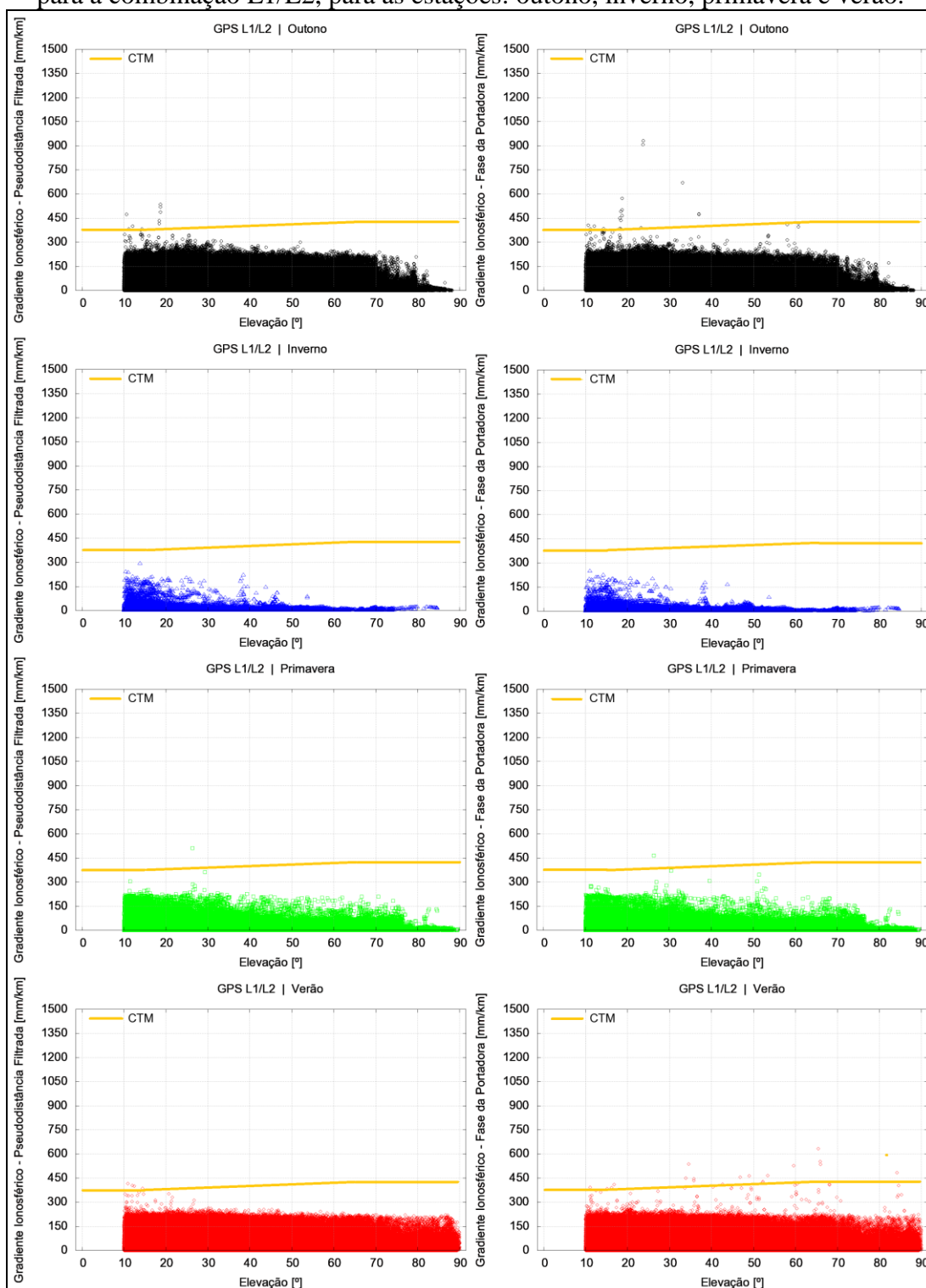
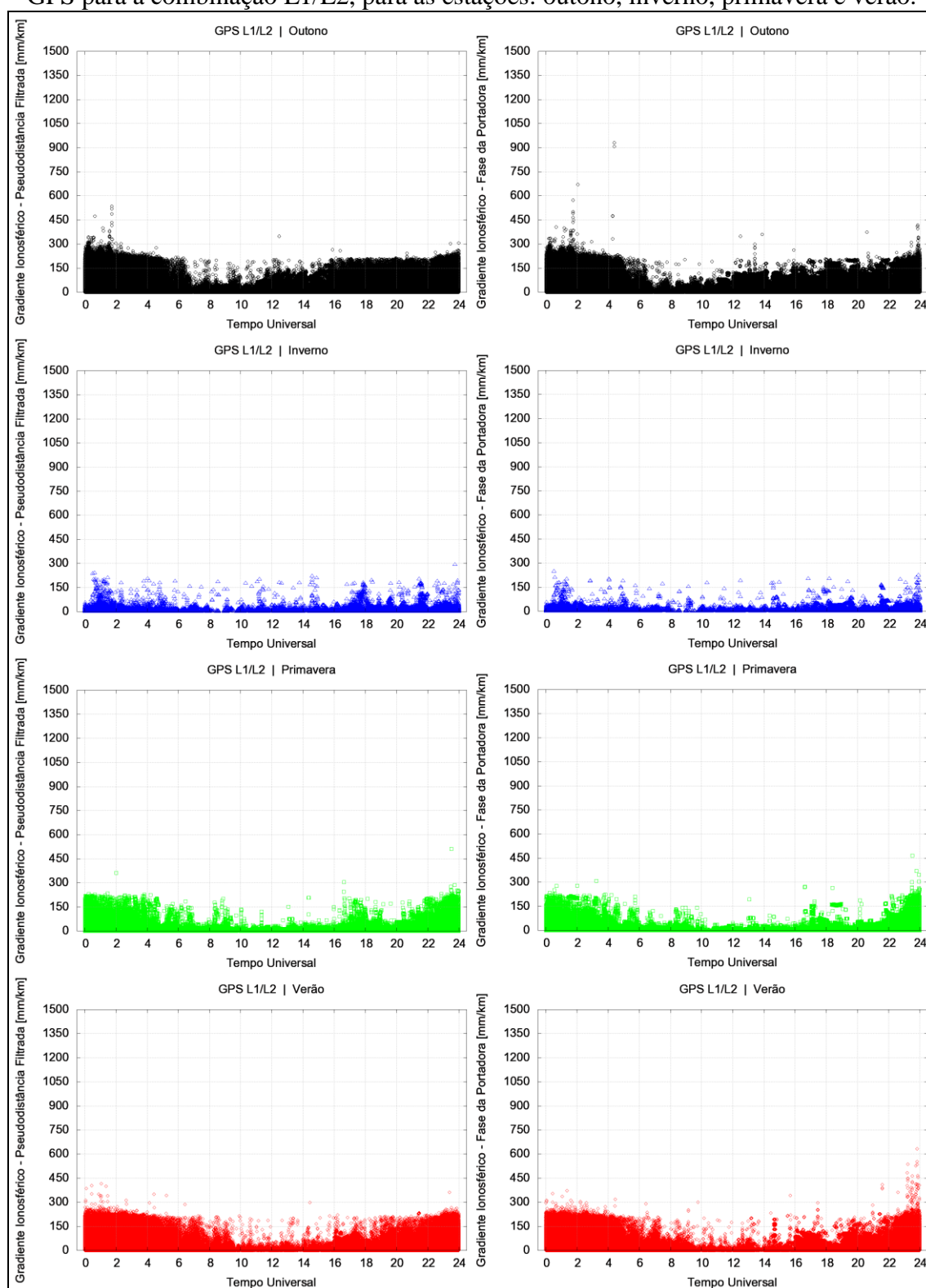


Figura 124 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBGL, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.



As análises do aeroporto SBGL são as mesmas realizadas para o aeroporto SBGR, devido às áreas de abrangência para as formações dos pares de estações dos dois casos compartilharem em comum uma porção superior a 70%. No entanto, algumas diferenças em relação às estimativas para o aeroporto paulista são estabelecidas:

- Há a possibilidade do uso do GBAS no aeroporto do Galeão, independente do ângulo de elevação e do horário, durante o período do inverno, conforme mostram os gradientes das Figuras 123 e 124, e durante a primavera com exceção da janela entre 23h e 24h TU (Figura 124);
- Durante o outono, as estimativas não atendem os limites do modelo norte-americano quando a elevação está compreendida aproximadamente entre 10° e 37° (Figura 123), sendo que os gradientes que superam o limiar estabelecido são inferiores a 931 mm/km;
- Durante o verão, os gradientes que excedem o limite do *CONUS Threat Model* estão compreendidos entre 21h e 24h TU (Figura 124); e
- Há uma correspondência entre os valores dos parâmetros obtidos com as medidas de fase com os estimados com a pseudodistância filtrada, para os períodos do inverno e primavera.

Um fato interessante a ser destacado trata-se da disposição latitudinal e longitudinal dos gradientes. A concentração dos altos valores, determinados nas posições dos IPP dos satélites, ocorre sobre a localização do aeroporto ($-22^\circ 48'$; $-43^\circ 15'$). Essa coincidência, que eleva a importância do uso do modelo do CONUS para o local, se traduz na obtenção dos maiores valores de desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical para as distâncias inferiores a 50 km. Quase todos os satélites, com exceção dos PRN 02 e 05, proporcionam desvios-padrão superiores a 10 mm/km para o dia 1 de março de 2014, atingindo um máximo de 95 mm/km referente ao $\sigma_{\text{vig_infla}}$ do satélite de PRN 01.

Análises a cerca da obtenção dos níveis de proteção horizontal e vertical da aeronave para essa região, utilizando os desvios-padrão estimados pelo programa tanto no modo pós-processado quanto em tempo real, são de suma importância, no sentido de averiguar se os níveis HPL e VPL atendem os requisitos HAL e VAL da ICAO. Experimento em tempo real desse tipo é apresentado na seção 6.6.

6.3.3 Aeroporto internacional de Brasília/DF – “Pres. Juscelino Kubitschek” (SBBR)

Nas Figuras 125 e 126 são apresentados gradientes, em função da elevação e do tempo universal, estimados para a região do aeroporto internacional de Brasília.

Figura 125 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBBR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

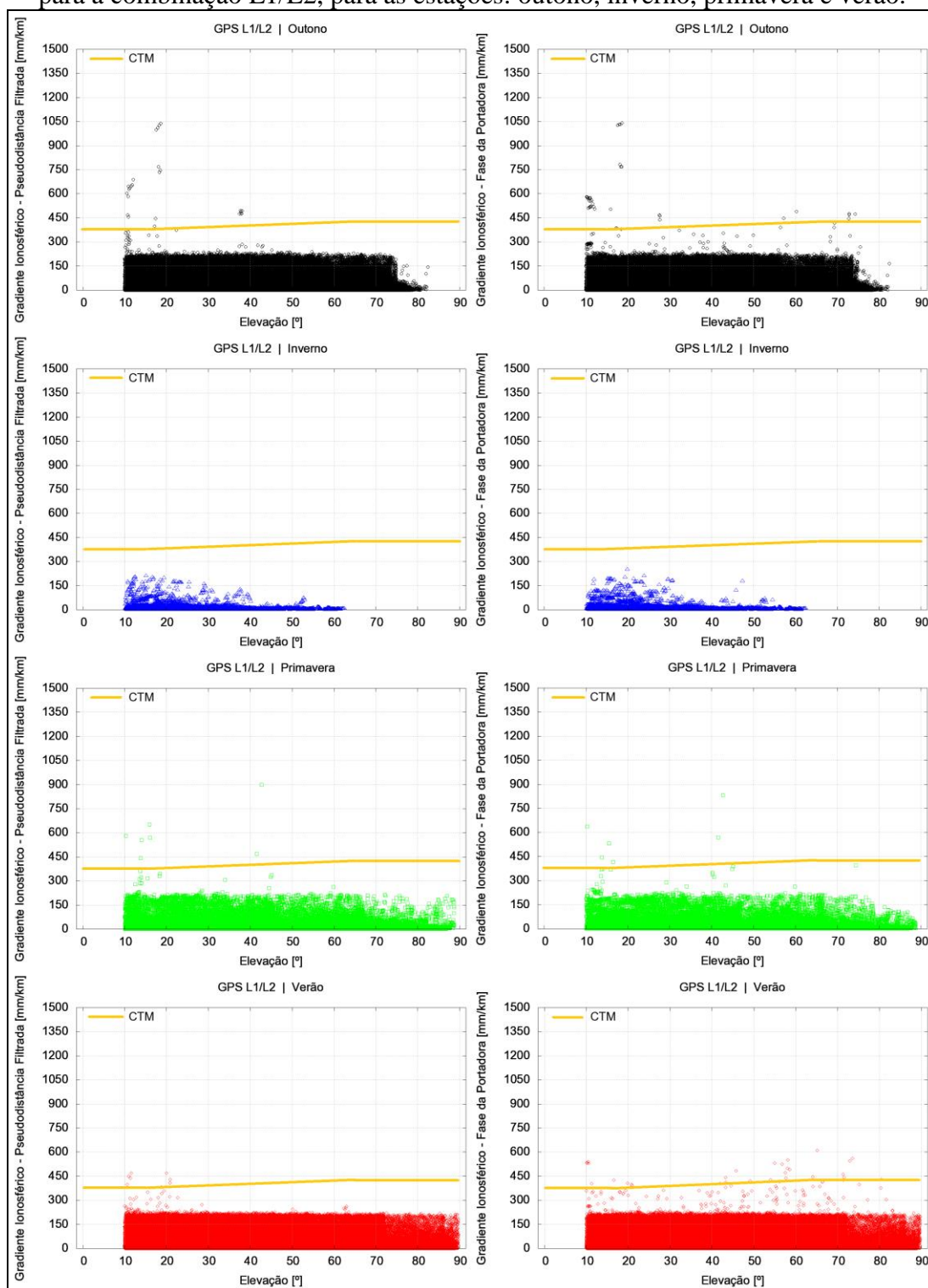
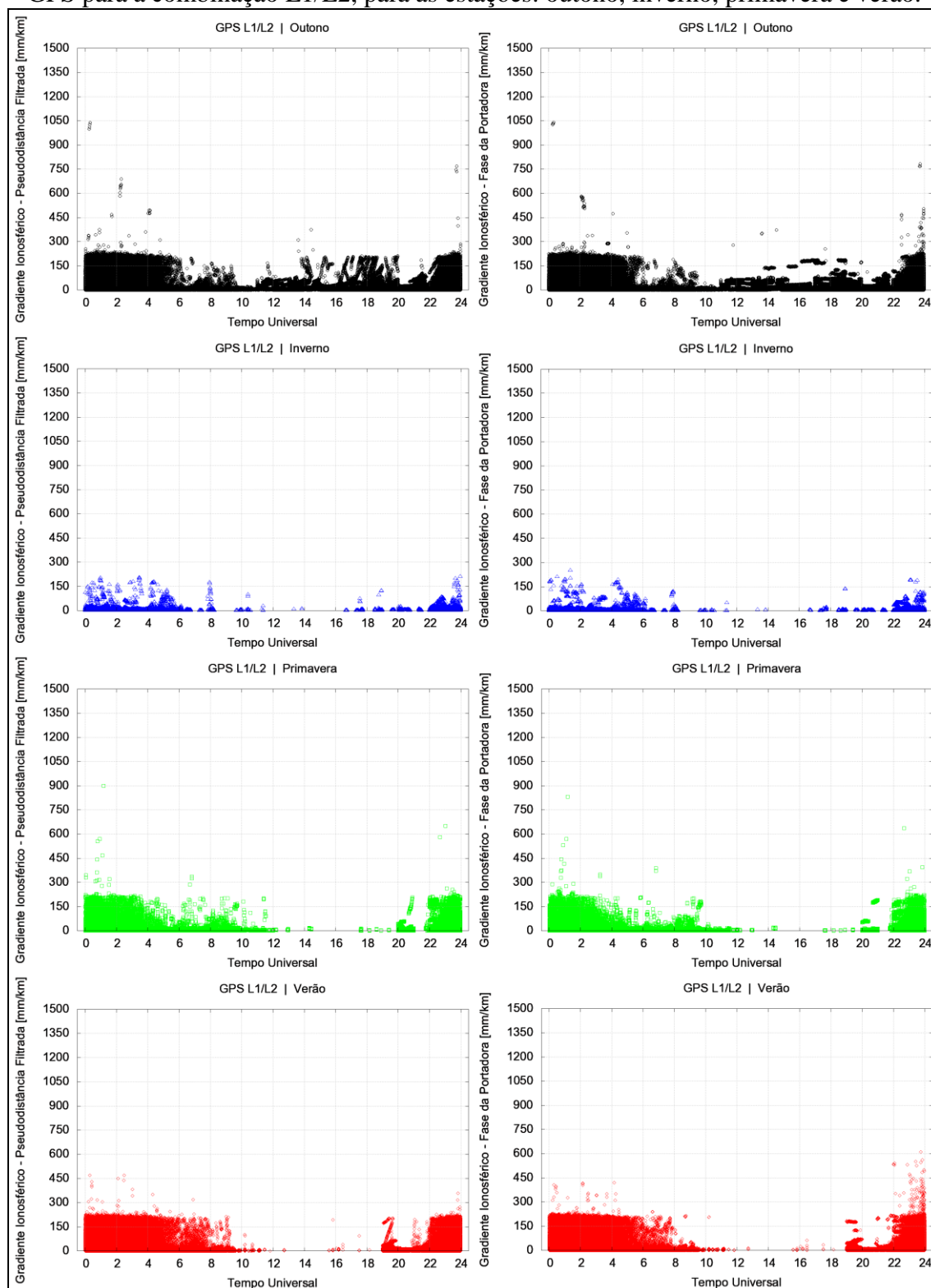


Figura 126 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBBR, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.



Diferentemente das regiões dos aeroportos SBGR e SBGL, a região do aeroporto internacional de Brasília é caracterizada por poucas e esparsas estações GNSS (considerando um raio de 500 km), sendo o número máximo de 36 pares obtidos para o dia 21 de junho de 2016. Entretanto, quatro pares de estações com distâncias inferiores a 25 km são estabelecidas na região: BRAS-BRAZ (distância de 10,334 km), BRAS-LBSB (distância de 10,990 km), BRAZ-LBSB (distância de 20,283 km) e MGUB-UBER (distância de 7,209 km).

Outro fato que merece destaque é o início de disponibilidade de dados apenas para o declínio do ciclo solar 23 (em 2004), onde BRAZ e UBER são as únicas estações disponíveis.

A proximidade da área de abrangência dos coeficientes do modelo com o equador magnético, onde a ionização é menos intensa, garante baixos valores de gradientes durante o período de inverno (Figura 125), sendo que há grande chance do GBAS ser empregado sem nenhuma restrição durante esse período. Em relação aos períodos de outono, primavera e verão, nota-se pela Figura 125 que alguns gradientes obtidos pela fase e pela pseudodistância filtrada superam o limite do *CONUS Threat Model*; porém, analisando a Figura 126, esses gradientes ficam restringidos para os horários entre 22h e 2h TU para a primavera, entre 22h e 3h TU para o verão e das 22h às 4h TU para o outono. Assim, o uso de uma estação GBAS no aeroporto SBBR poderia ser realizado, com atenção especial para os intervalos citados anteriormente.

O uso de medidas de pseudodistância filtrada para a estimativa dos parâmetros se mostrou uma alternativa válida, pois ao comparar os resultados verifica-se certa similaridade com os valores de fase da portadora.

Um resultado que necessita de futuras investigações trata-se dos valores de σ_{vig} e σ_{vig_infla} estimados para o bloco 0-50 km. Verifica-se que os níveis de desvio-padrão dos satélites GPS de PRN 01, 08, 09 e 27 são superiores aos obtidos para as regiões dos aeroportos SBGR e SBGL, mesmo esses satélites apresentando valores de gradientes inferiores a 450 mm/km.

6.3.4 Aeroporto internacional de Porto Alegre/RS – “Salgado Filho” (SBPA)

As Figuras 127 e 128 mostram os gradientes ionosféricos para a região do aeroporto internacional de Porto Alegre.

Figura 127 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBPA, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

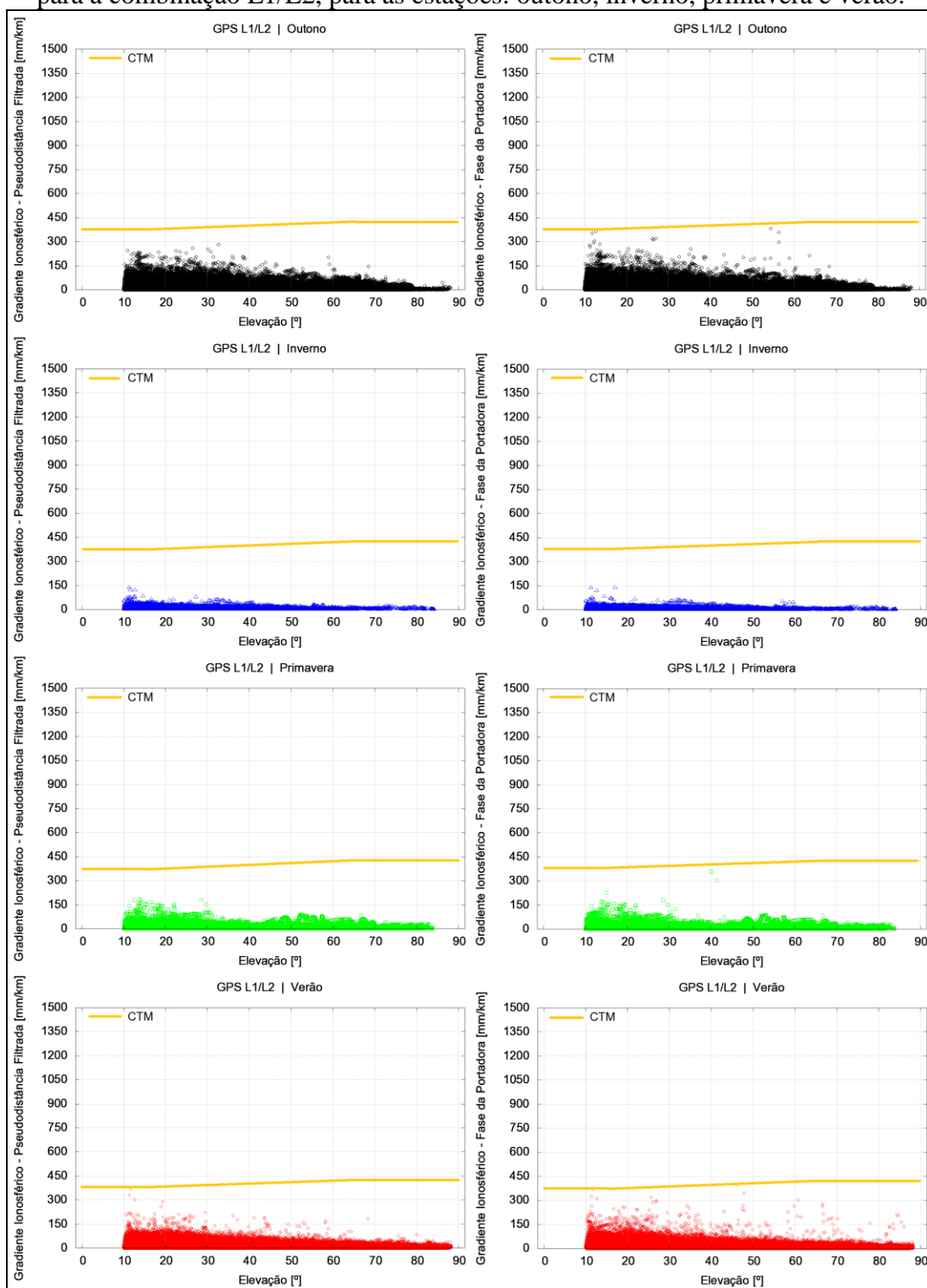
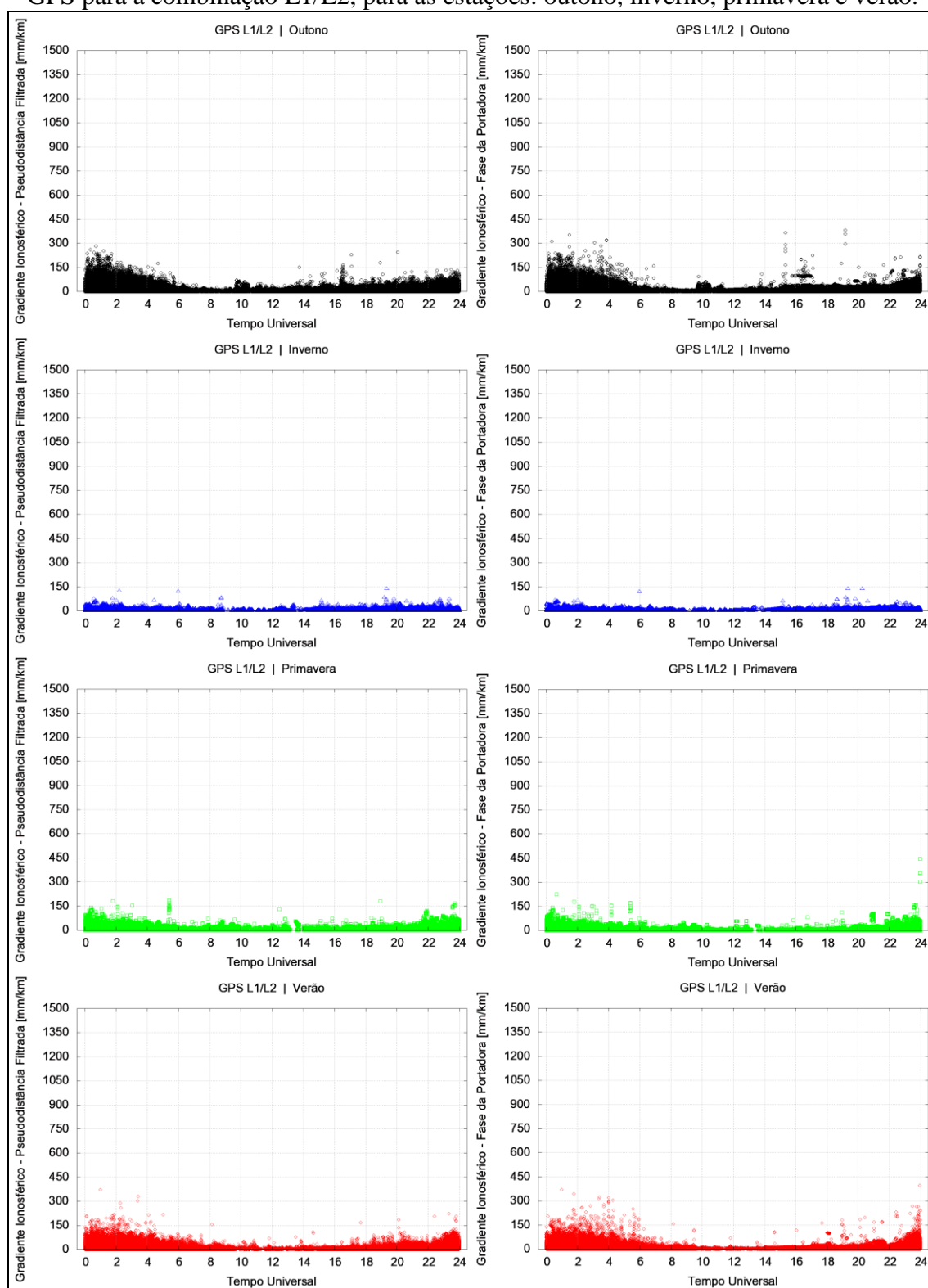


Figura 128 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBPA, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.



Situação análoga ao caso do aeroporto SBBR em termos de número de estações GNSS disponíveis, tem-se que poucos pares de estações são formados para a região do aeroporto internacional de Porto Alegre (máximo de 32 pares para o dia 21 de junho de 2016).

Analisando os valores dos gradientes das Figuras 127 e 128 pode-se observar que o aeroporto SBPA é o único, entre os selecionados na pesquisa, que atende os limites do modelo norte-americano em sua plenitude, tanto utilizando medidas de fase quanto combinações de pseudodistância filtrada. Isso ocorre devido à área de abrangência para a formação dos pares estar situada, em sua grande parte, na região de médias latitude. Assim, pode-se, provavelmente, utilizar um GBAS no aeroporto sem nenhuma restrição de horário, de elevação ou de estação do ano.

A região de médias latitudes é caracterizada por apresentar um comportamento menos variável do que as demais regiões geográficas da ionosfera. O sucesso do atendimento dos parâmetros se deve também ao fato de que o território dos Estados Unidos estar situado completamente na região de médias latitudes, conforme apresenta a Figura 22, sendo o *CONUS Threat Model* desenvolvido especificamente para essa região.

Uma vez que as estimativas atendem os limites, isso se manifesta diretamente nos valores estimados para o desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical dos satélites GPS (L1/L2). Quase a totalidade dos satélites apresentam um σ_{vig} inferior a 10 mm/km e um $\sigma_{\text{vig_infla}}$ abaixo de 20 mm/km para as distâncias entre 0 e 50 km, valores esses muito próximo ao 4 mm/km determinado pelo modelo norte-americano.

6.3.5 Aeroporto internacional de Recife/PE – “Gilberto Freyre” (SBRF)

Os gradientes ionosféricos para a região do aeroporto internacional de Recife são apresentados nas Figuras 129 e 130.

Figura 129 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBRF, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.

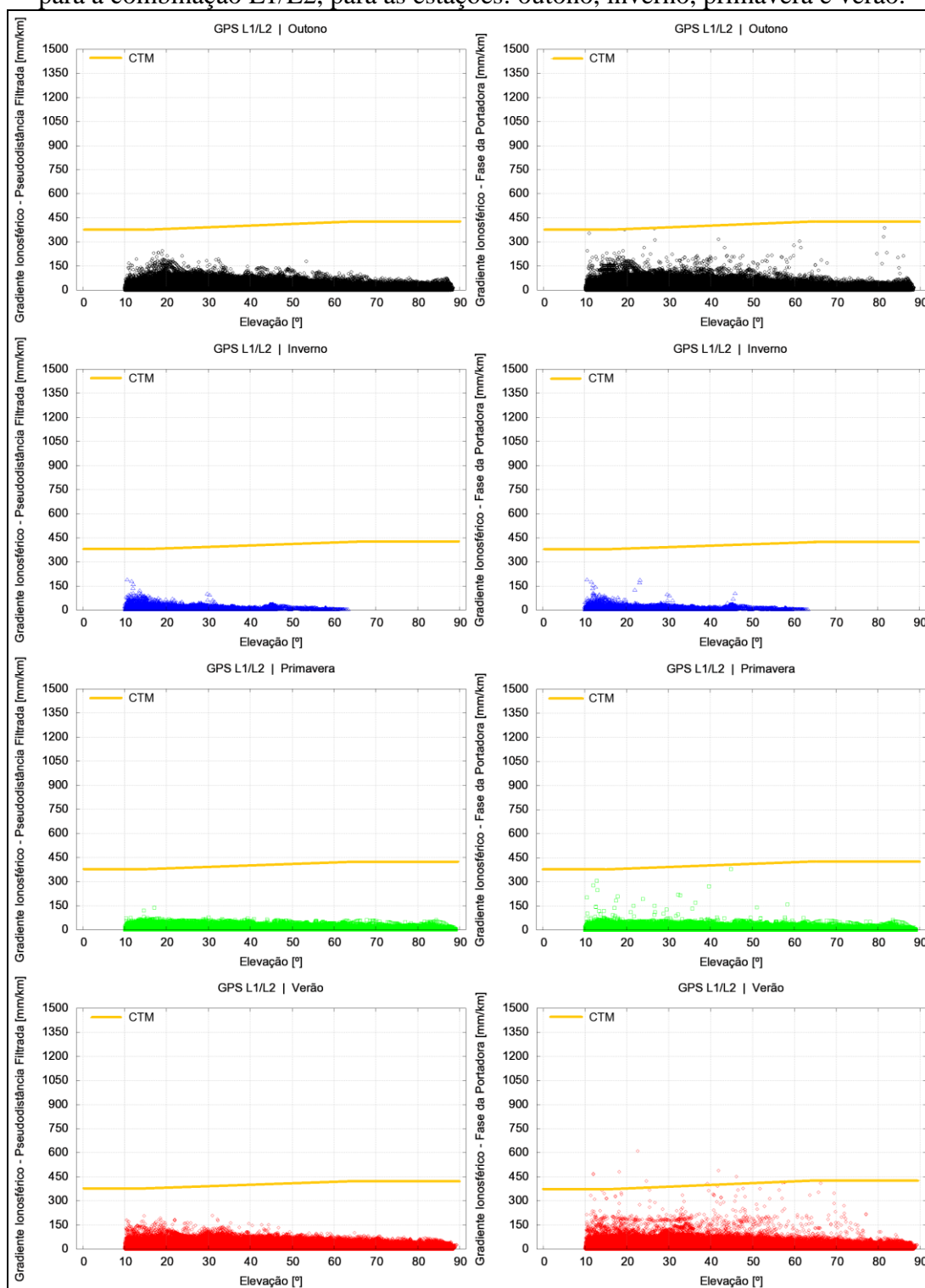
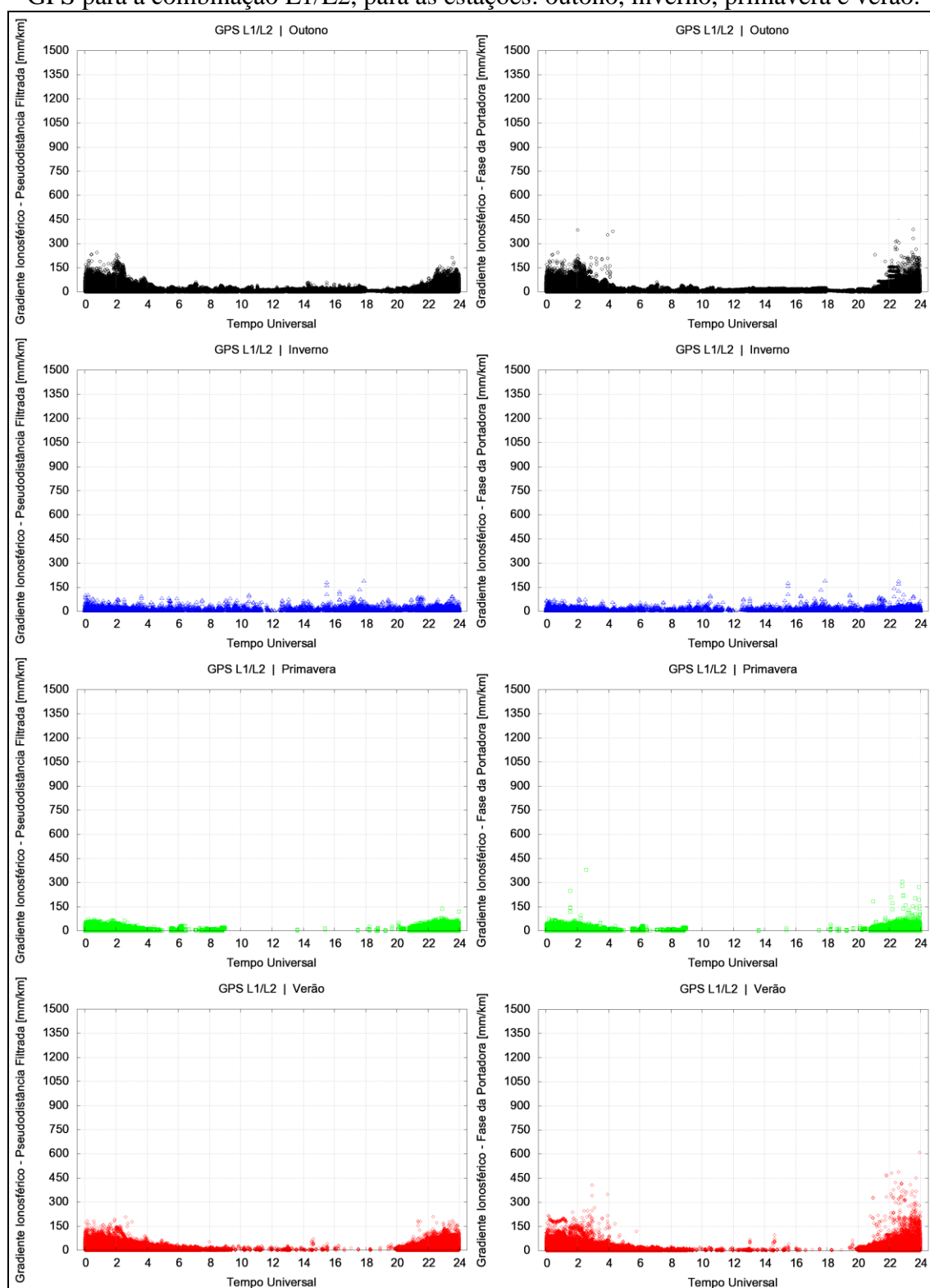


Figura 130 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa local-temporal dos parâmetros do modelo para o aeroporto SBRF, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2, para as estações: outono, inverno, primavera e verão.



Para a avaliação dos parâmetros local-temporais do modelo do CONUS para o aeroporto SBRF destaca-se o fato de haver observáveis GNSS apenas para o ciclo solar 24, pois poucas estações estavam disponíveis na região para a formação dos pares.

Baseado na disposição latitudinal dos gradientes tem-se que o aeroporto internacional de Recife localiza-se próximo ao equador magnético, bem como sob os efeitos da AIE. Observa-se pela Figura 129 que apenas durante o verão os gradientes estimados não satisfazem o limite do *CONUS Threat Model*, considerando as medidas de fase.

Analisando em relação aos horários de ocorrência (Figura 130), os gradientes superiores a 425 mm/km durante o verão estão concentrados no intervalo de tempo entre 21h e 24h TU, equivalente às 18h e 21h no horário local. Dessa forma, o uso do GBAS para a região do aeroporto SBRF é inicialmente recomendado durante todo ano, exceto na janela de horário determinada para o verão.

Em termos de desvio-padrão dos gradientes, são poucos os satélites que proporcionam valores de σ_{vig} maiores que 10 mm/km (PRN 03, 11, 14, 19, 20, 22 e 27) para as distâncias de até 50 km. Assim, para a determinação dos níveis de proteção das aeronaves recomenda-se realizar a técnica *Screening*, ou seja, utilizar apenas os satélites que proporcionam os menores desvios-padrão. Embora não mencionado anteriormente para os outros casos, essa técnica deve ser aplicada sempre que há um número suficiente de satélites com baixos valores de desvio-padrão; porém, a exclusão dos satélites com altos desvios-padrão deve ser controlada com o objetivo de não ocasionar uma degradação do PDOP.

6.4 Investigação do Uso da Portadora L5 do GPS e dos Sinais GLONASS e Galileo na Estimativa dos Parâmetros do Modelo CONUS de Risco Ionosférico

Em se tratando da portadora L5 do GPS é esperado que o uso concomitante com a L1 permita uma minimização do erro ionosférico na navegação aérea, principalmente no GBAS. Nesse sentido, gradientes ionosféricos foram obtidos para os satélites GPS para a combinação de portadoras L1/L5, sendo considerada para esse fim uma estimativa geral dos parâmetros do modelo considerando todo o território brasileiro, adotando uma distância máxima de 250 km para a formação dos pares, altura média da camada ionosférica de 350 km e máscara de elevação de 10°.

Devido os sinais da portadora L5 serem transmitidos apenas pelos satélites GPS do bloco IIF, os quais foram lançados entre os anos de 2010 e 2016, é apenas em 17 de março de 2013 que os primeiros pares de estações das redes ativas registram tais sinais. Dessa

forma, as estimativas se restringem a apenas ao uso de dados referentes ao ápice e declínio do ciclo solar 24.

Outra questão a se destacar é sobre a quantidade de receptores que são capazes de registrar os sinais da portadora L5. Apenas as estações da rede CIGALA/CALIBRA, da rede ICEA e algumas estações das redes GNSS-SP e IGS possuem receptores de tripla frequência. Assim, salienta-se que os valores dos parâmetros não contemplam todas as regiões brasileiras. As Figuras 131 a 141 apresentam os gradientes ionosféricos obtidos pelo programa em função das variáveis já apresentadas.

Figura 131 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

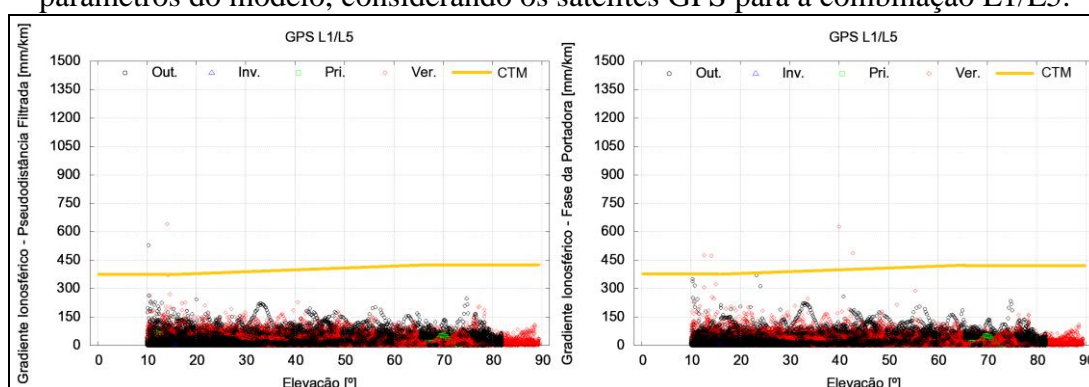


Figura 132 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referente à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

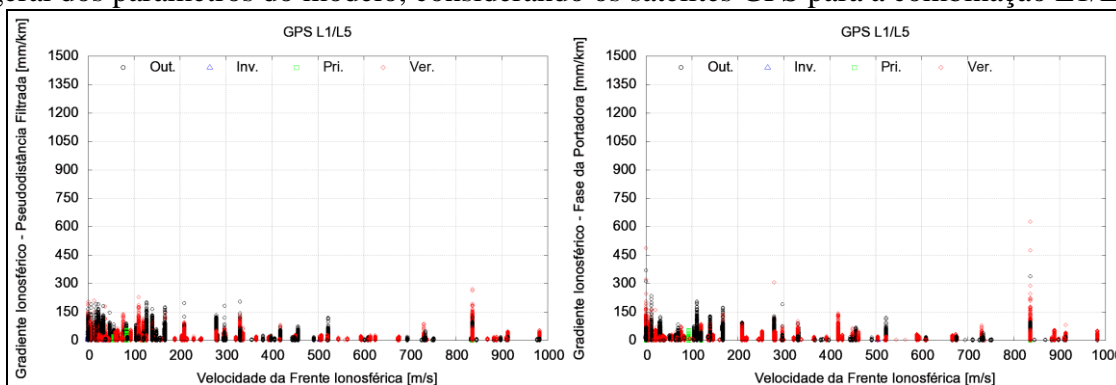


Figura 133 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

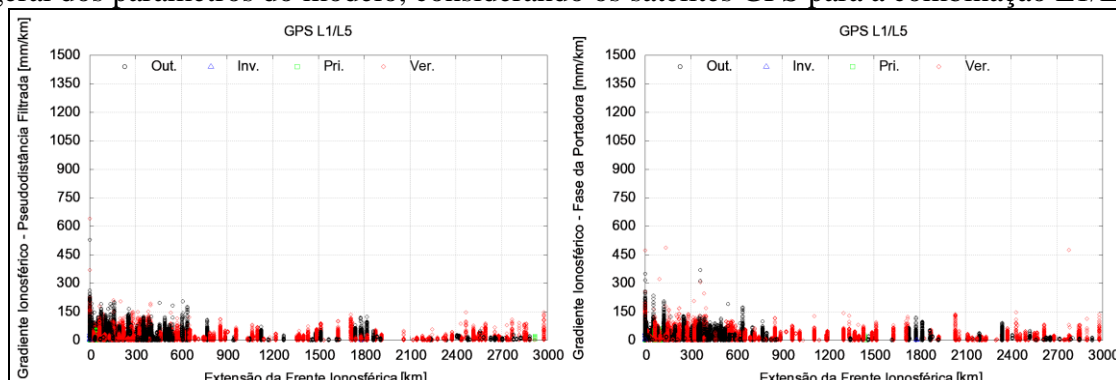


Figura 134 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

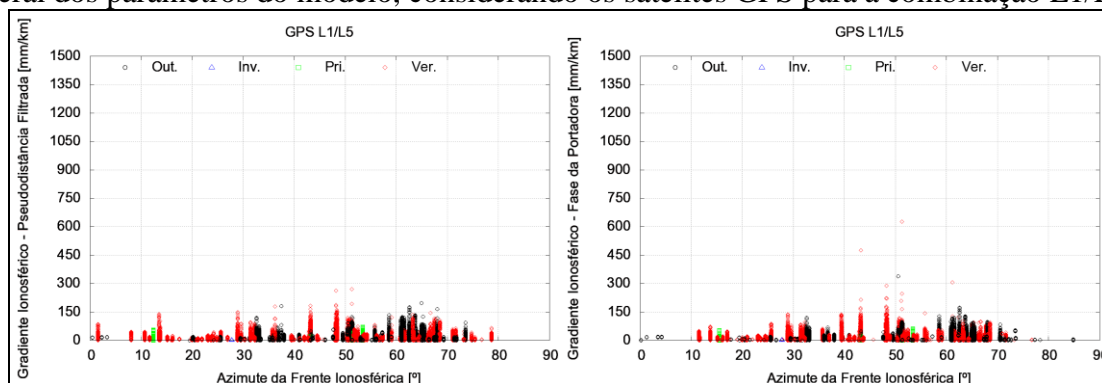


Figura 135 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

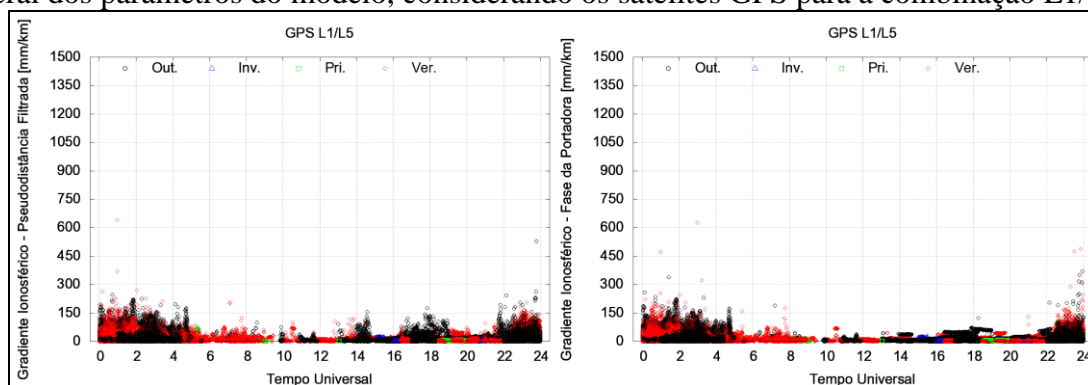


Figura 136 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

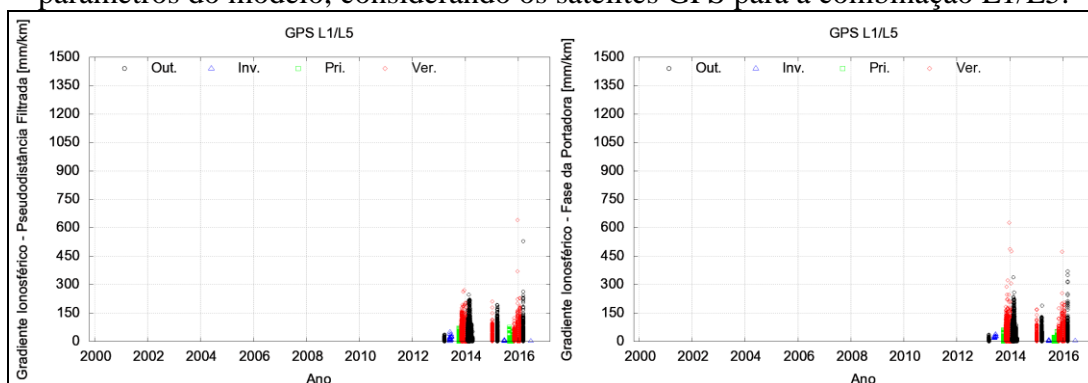


Figura 137 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

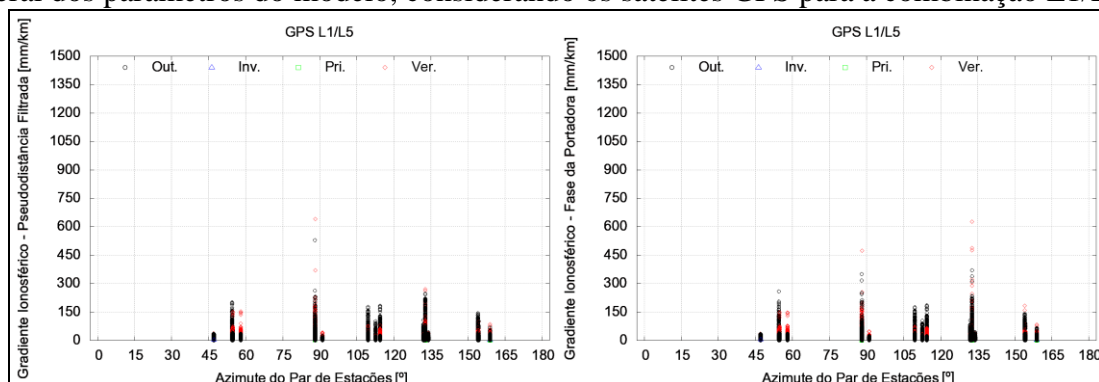


Figura 138 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

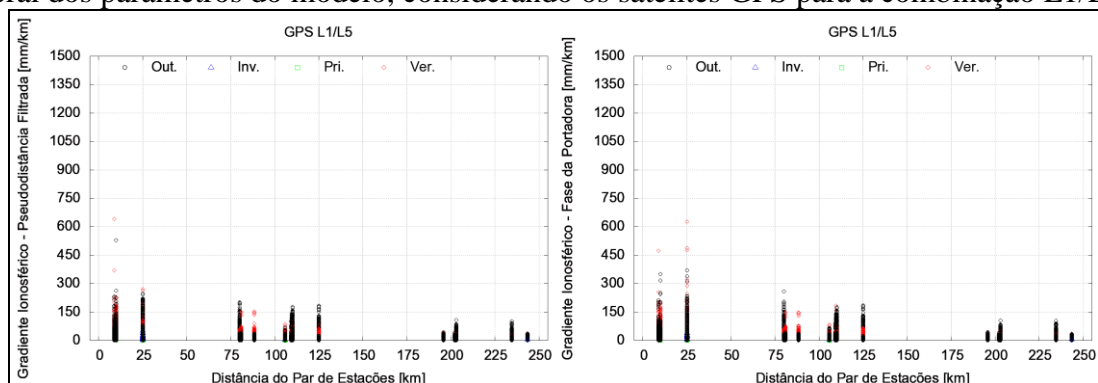


Figura 139 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

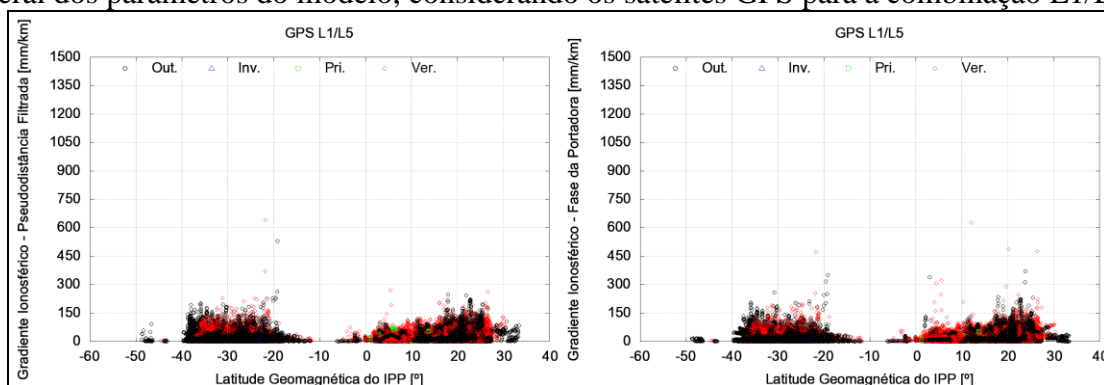


Figura 140 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

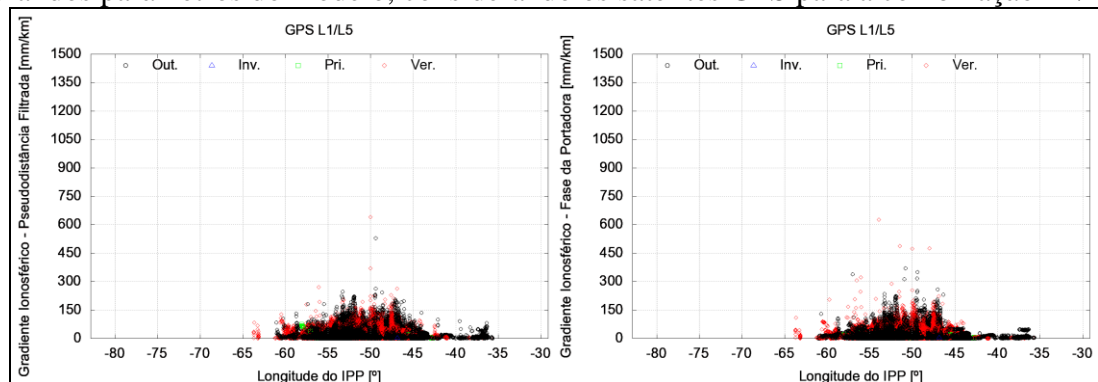
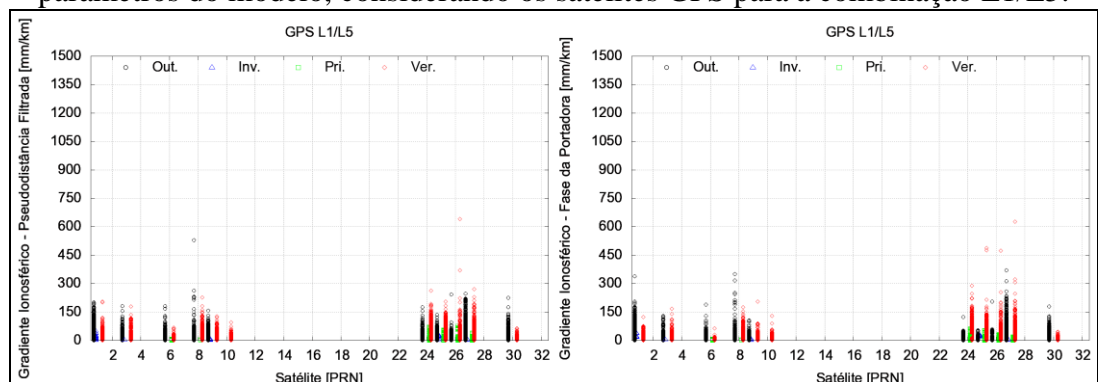


Figura 141 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.



A partir dos resultados dos gradientes em função da elevação dos satélites (Figura 131) conclui-se que, para o conjunto de dias utilizados nos experimentos, a maioria dos gradientes permaneceu abaixo do limite do modelo norte-americano, com exceção de alguns gradientes ocorridos durante o verão e pertencentes ao intervalo das 23h às 3h TU (Figura 135).

Fato importante de se ressaltar é que os valores dos gradientes a partir da combinação L1/L5 apresentaram ser inferiores aos resultados obtidos para os mesmos dias e satélites quando se utiliza a combinação L1/L2 do GPS, provavelmente devido ao baixo ruído da L5 em comparação a L2 (CIRCIU et al., 2014). Em termos numéricos as Tabelas 20 e 21 apresentam os dez maiores gradientes estimados quando se utiliza a pseudodistância filtrada e a fase da portadora, respectivamente.

Tabela 20 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2015-354	ICEA-SJCU	8,907	88,226	26	0,975	640,616	14,143
2016-066	SJCE-SJCU	9,921	88,022	08	23,775	528,447	10,290
2015-354	ICEA-SJCU	8,907	88,226	26	0,966	369,130	14,279
2013-353	KOUG-KOUR	25,070	132,696	27	2,050	269,627	14,650
2013-338	KOUG-KOUR	25,070	132,696	24	0,158	262,717	10,647
2016-066	SJCE-SJCU	9,921	88,022	08	23,766	262,241	10,418
2014-050	KOUG-KOUR	25,070	132,696	27	0,700	246,348	74,715
2016-066	KOUG-KOUR	25,070	132,696	26	22,141	242,933	20,004
2016-066	ICEA-SJCU	8,907	88,226	08	23,741	231,730	10,806
2016-020	SJCE-SJCU	9,921	88,022	27	0,891	229,525	40,575

Tabela 21 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L5.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2013-354	KOUG-KOUR	25,070	132,696	27	2,983	626,640	39,966
2013-365	KOUG-KOUR	25,070	132,696	25	23,850	486,934	42,772
2014-023	KOUG-KOUR	25,070	132,696	25	23,500	475,354	12,698
2015-354	ICEA-SJCU	8,907	88,226	26	0,975	472,994	14,143
2016-066	KOUG-KOUR	25,070	132,696	27	23,941	370,777	23,283
2016-066	SJCE-SJCU	9,921	88,022	08	23,775	350,355	10,290
2014-050	KOUG-KOUR	25,070	132,696	01	1,416	338,825	10,339
2013-336	KOUG-KOUR	25,070	132,696	27	3,225	321,572	15,017
2016-066	SJCE-SJCU	9,921	88,022	08	23,741	316,957	10,805
2016-066	KOUG-KOUR	25,070	132,696	27	23,900	312,936	24,004

Com base nos valores das Tabelas 20 e 21 nota-se que os maiores valores obtidos são referentes ao par KOUG-KOUR, localizado na Guiana Francesa, região essa sob o efeito da AIE ao norte do equador magnético, e ao par ICEA-SJCU, situado em São José dos Campos/SP, em que se encontra sob a influência da crista sul da AIE.

As extensões das frentes ionosféricas determinadas a partir das portadoras L1 e L5, da ordem de 2.990 km, conforme podem ser extraídas da Figura 133, condizem com os respectivos comprimentos provenientes da combinação L1/L2 (seção 6.2). O mesmo comportamento ocorre para as variações da velocidade da frente, sendo a velocidade máxima oriunda das portadoras L1 e L5 (em torno de 835 m/s) ligeiramente menor que as determinadas para L1 e L2. No entanto, ressalta-se novamente para o problema da determinação dos instantes de máximo e de mínimo dos atrasos ionosféricos, em que também foram utilizados os pares de estações perpendiculares ao deslocamento da frente ionosférica, o que resultou em valores incoerentes com a realidade.

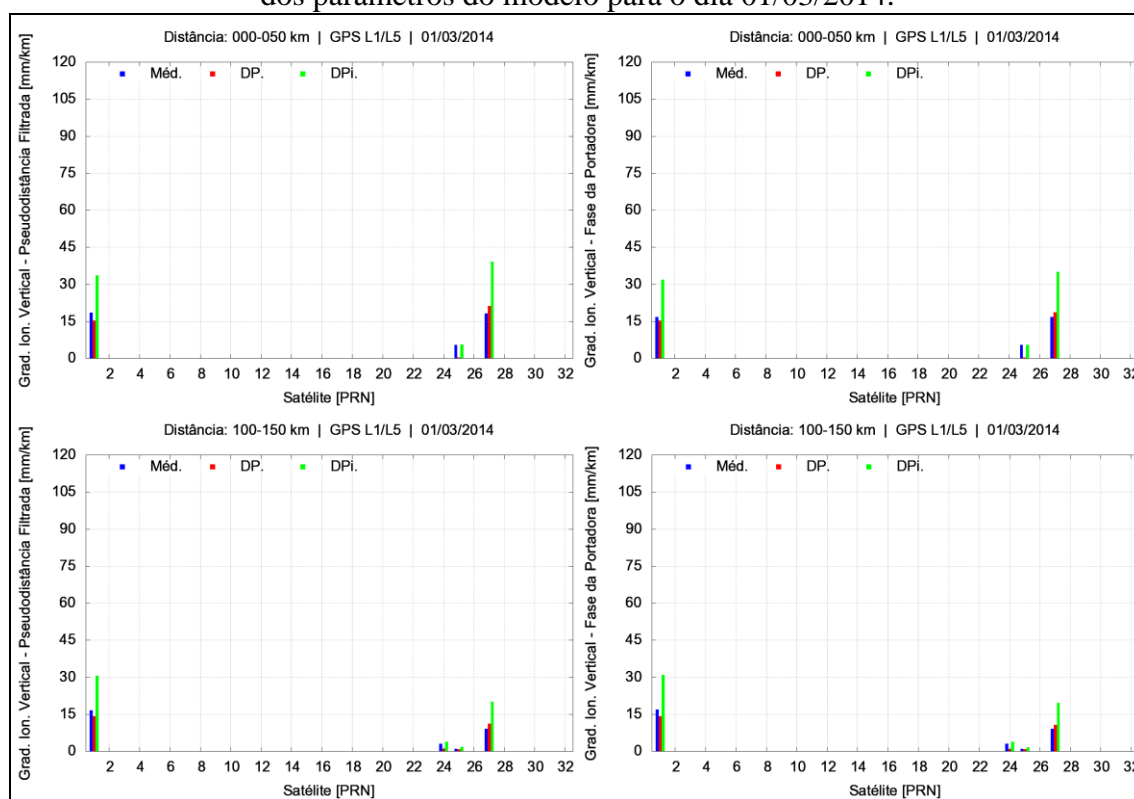
Em relação ao valor máximo de atraso ionosférico, da ordem de 46 m, tem-se que o mesmo é inferior aos 55 m obtidos para o caso L1/L2. A justificativa encontra-se no período de dados analisados, de 2013 em diante, sendo o valor de 55 m obtido para o dia 7 de novembro de 2001.

Tomando como referência os horários de ocorrência dos gradientes (Figura 135) nota-se que o comportamento dos valores concorda com os horários de atuação das irregularidades ionosféricas.

Uma compreensão do tamanho da região em que se estimaram os gradientes ionosféricos, em termos de amplitude latitudinal e longitudinal, é obtida a partir das Figuras 139 e 140. Na direção longitudinal foram estimados gradientes para região compreendida entre -64° e -36° , ao passo que na direção norte-sul os gradientes se situaram em duas regiões bem definidas: uma próxima ao equador magnético e outra próxima ao local de transição das regiões de baixas e médias latitudes. Assim, gradientes foram estimados para duas regiões ionosféricas distintas: uma com ionização menos intensa e outra mais intensa, respectivamente.

Em relação à quantidade de satélites GPS que transmitiram o sinal L5, e que por sua vez foram registrados pelos receptores das estações, tem-se apenas 11 satélites: PRN 01, 03, 06, 08, 09, 10, 24, 25, 26, 27 e 30 (Figura 141). Os desvios-padrão dos gradientes verticais obtidos para os satélites disponíveis em 1 de março de 2014 são apresentados na Figura 142.

Figura 142 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L5 dos blocos 0-50 km e 100-150 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.



Ao comparar os valores da Figura 142 com os da Figura 109 (caso L1/L2) observa-se que os desvios-padrão a partir das portadoras L1 e L5 são inferiores aos das portadoras L1 e L2 para os mesmos satélites e dia de processamento, o que indica que há, de fato, uma provável minimização do erro ionosférico na determinação dos níveis de proteção horizontal e vertical das aeronaves.

Apesar dos resultados utilizando os sinais da combinação L1/L5 dos satélites GPS serem melhores que os das portadoras L1 e L2 em uma análise inicial salienta-se para a necessidade de utilização de mais pares de estações e um maior conjunto de dias para a estimativa dos parâmetros, de forma a representar com mais realidade as condições ionosféricas brasileiras.

A utilização dos sinais dos satélites GLONASS nas portadoras L1 e L2 para a estimativa geral dos parâmetros para o Brasil, sendo consideradas as mesmas configurações iniciais anteriores, conduz a conclusão de que os mesmos resultados e análises obtidos para os sinais GPS na combinação L1/L2 (seção 6.2) são válidos para o sistema russo, conforme apresentam os gráficos das Figuras 143 a 153, os mapas da Figura 154, os gradientes das Tabelas 22 e 23 e os desvios-padrão da Figura 155.

Figura 143 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.

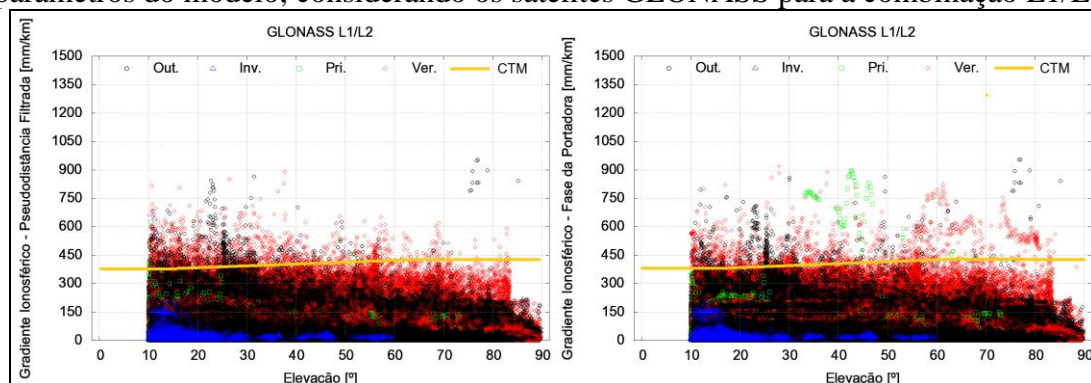


Figura 144 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referente à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.

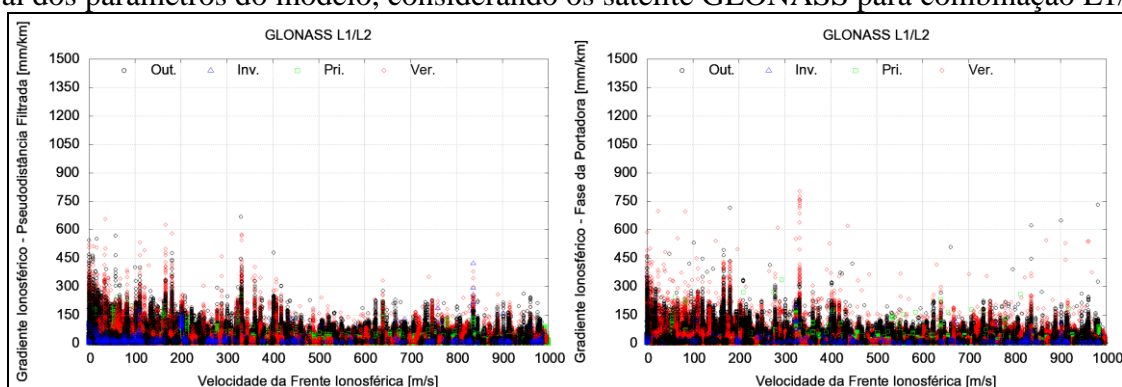


Figura 145 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.

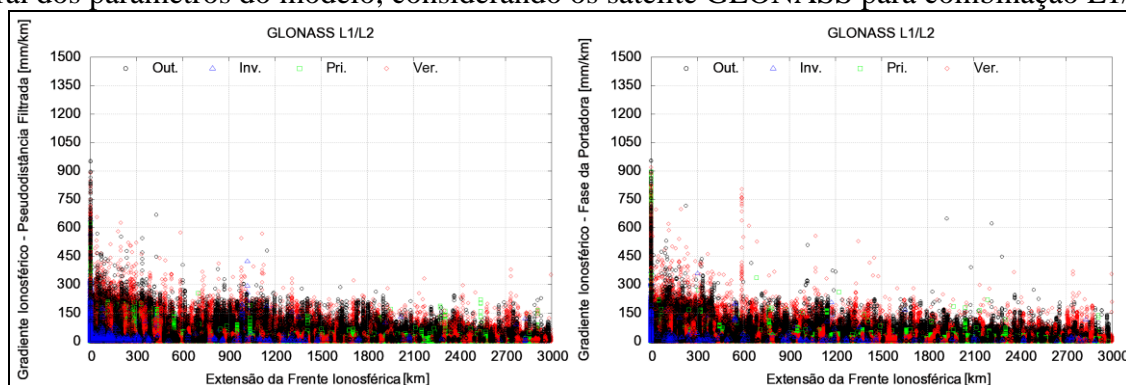


Figura 146 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.

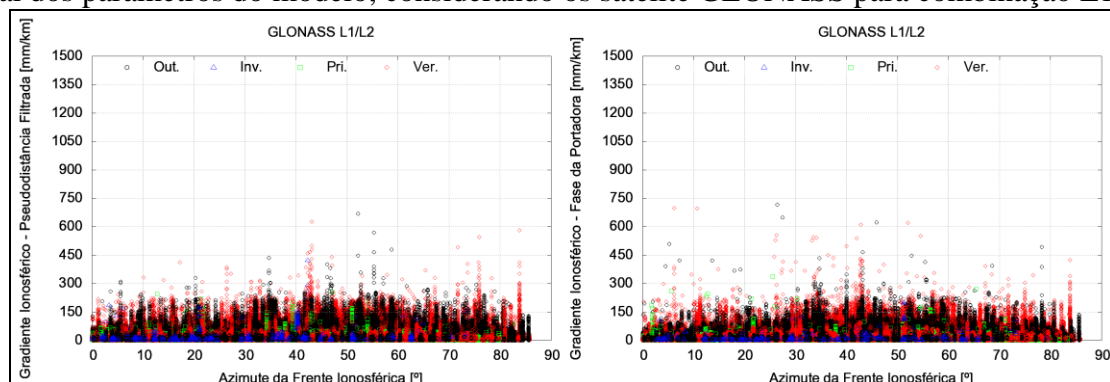


Figura 147 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.

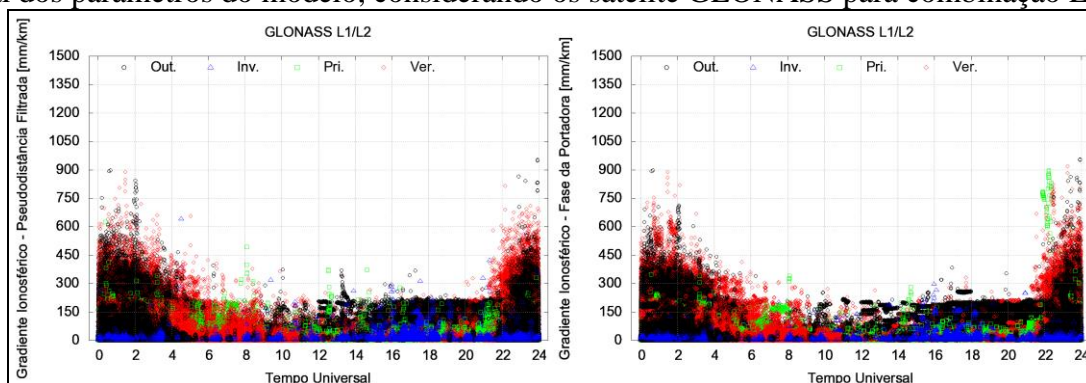


Figura 148 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.

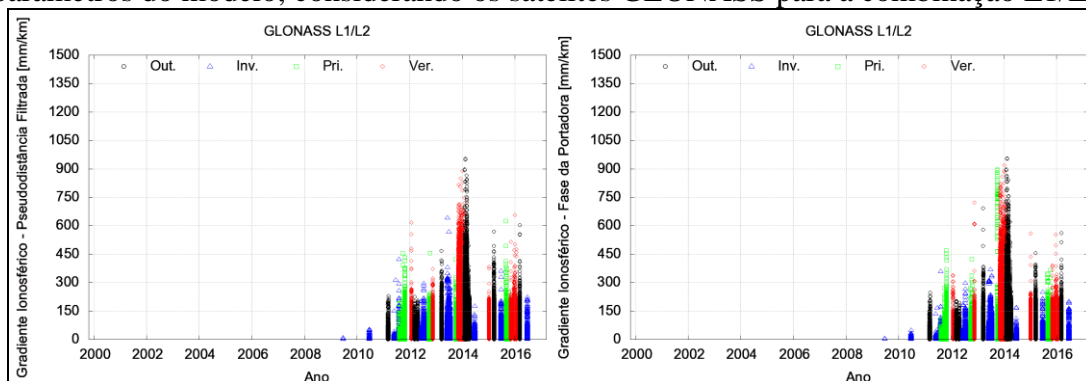


Figura 149 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.

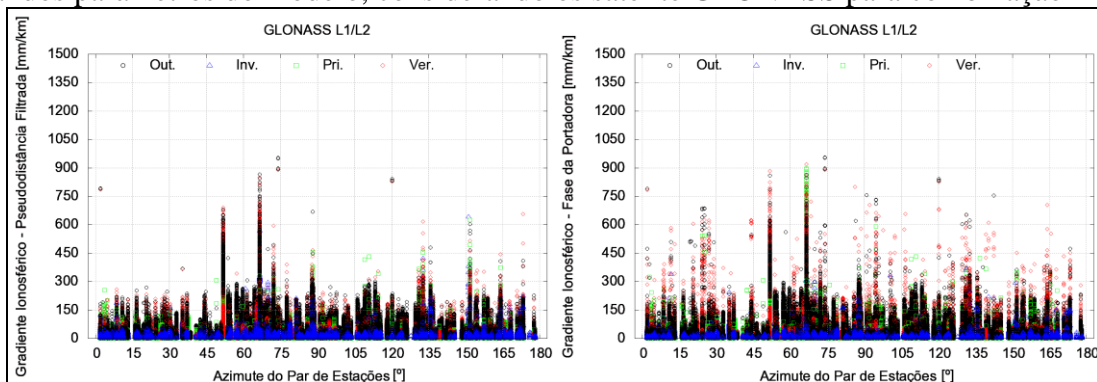


Figura 150 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélite GLONASS para combinação L1/L2.

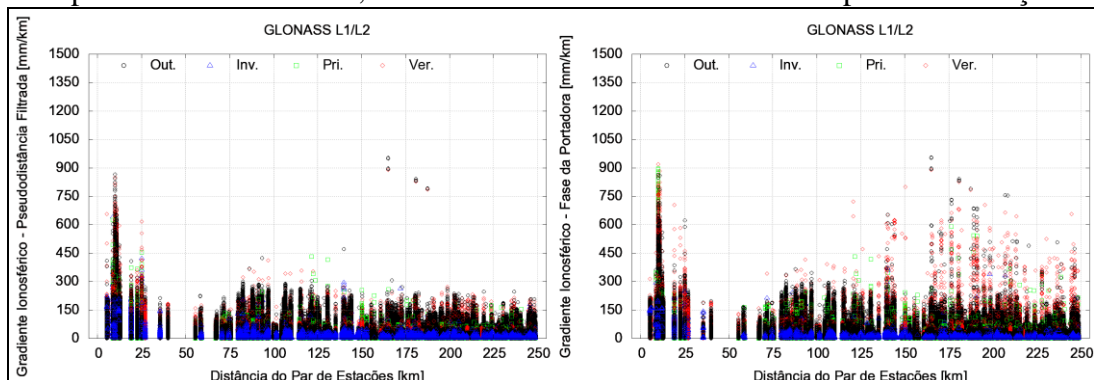


Figura 151 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando o satélite GLONASS para combinação L1/L2.

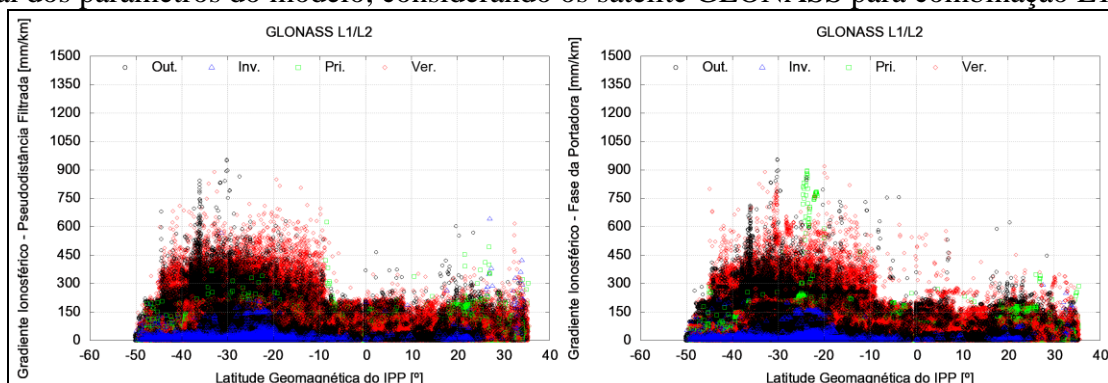


Figura 152 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando o satélite GLONASS para combinação L1/L2.

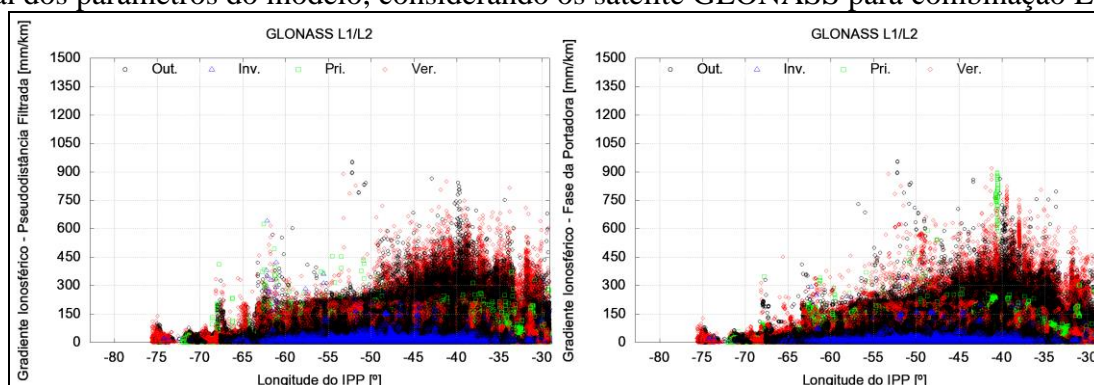


Figura 153 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.

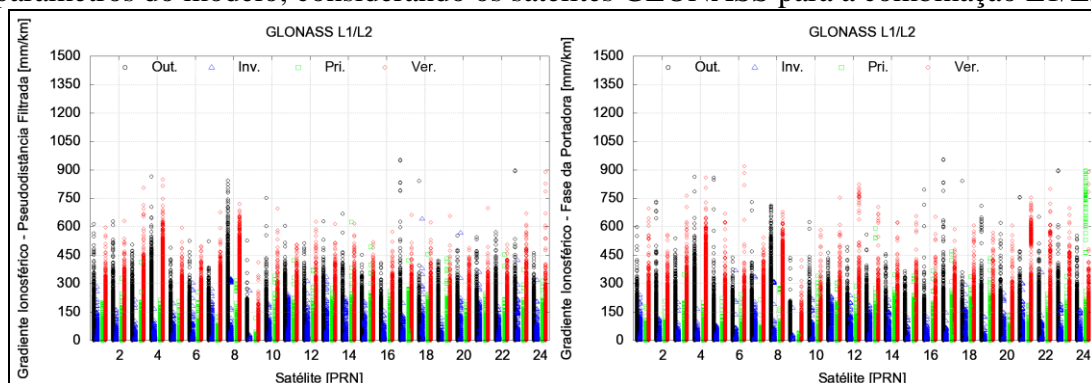


Figura 154 – Mapas de direção e velocidade da frente para os satélites GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.

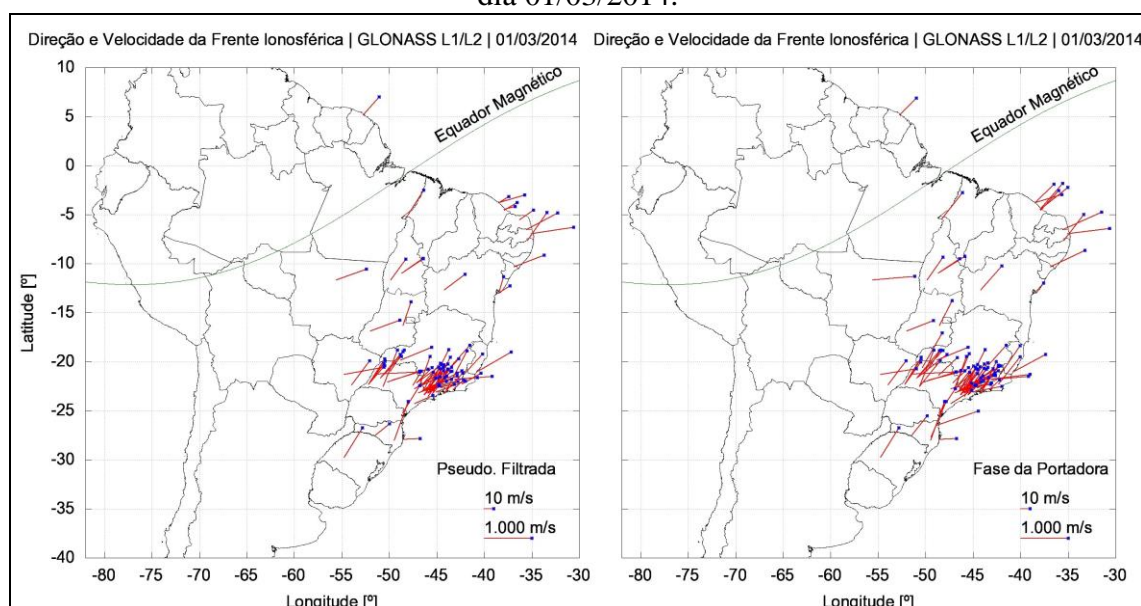


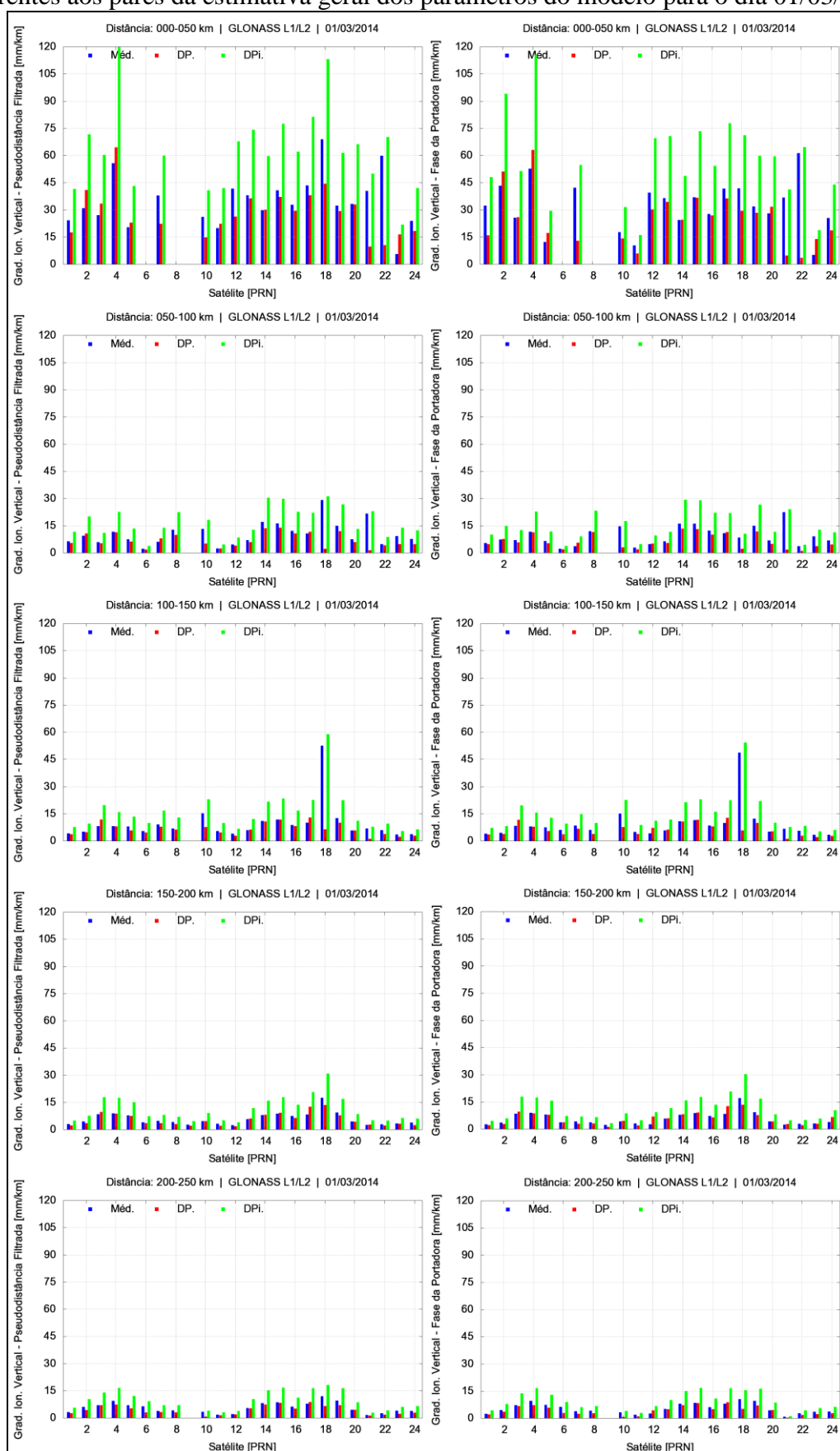
Tabela 22 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2014-043	PRU1-ROSA	165,169	74,022	17	23,933	953,029	77,038
2014-043	PRU1-ROSA	165,169	74,022	17	23,925	949,418	76,732
2014-034	PRU1-ROSA	165,169	74,022	23	0,675	896,693	78,952
2014-034	PRU1-ROSA	165,169	74,022	23	0,591	893,201	75,889
2014-003	PRU1-ROSA	165,169	74,022	24	1,475	888,337	37,785
2014-060	SAVO-SSA1	9,966	66,495	04	22,891	866,054	31,477
2013-339	SAVO-SSA1	9,966	66,495	04	1,475	849,210	26,449
2014-064	SAVO-SSA1	9,966	66,495	08	2,025	843,159	22,720
2014-059	OURI-PRU1	180,767	120,234	18	23,266	841,502	85,180
2014-043	OURI-PRU1	180,767	120,234	17	23,933	834,134	77,104

Tabela 23 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites GLONASS para a combinação L1/L2.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2014-043	PRU1-ROSA	165,169	74,022	17	23,933	955,114	77,038
2014-043	PRU1-ROSA	165,169	74,022	17	23,925	953,684	76,732
2014-007	SAVO-SSA1	9,966	66,495	06	23,258	918,416	27,978
2014-034	PRU1-ROSA	165,169	74,022	23	0,675	897,199	78,952
2013-275	SAVO-SSA1	9,966	66,495	24	22,225	894,722	42,741
2014-034	PRU1-ROSA	165,169	74,022	23	0,591	893,673	75,889
2013-275	SAVO-SSA1	9,966	66,495	24	22,216	892,539	42,523
2014-003	PRU1-ROSA	165,169	74,022	24	1,475	889,349	37,785
2014-007	SAVO-UFBA	10,830	51,760	06	23,258	883,653	27,965
2013-275	SAVO-SSA1	9,966	66,495	24	22,233	880,873	42,957

Figura 155 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2 dos blocos 0-50 km, 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km e 200-250 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.



Uma vez que há uma semelhança de resultados entre GPS e GLONASS (L1/L2), os satélites do último sistema podem ser utilizados, futuramente, pelo GBAS para a transmissão dos valores do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical, proporcionando dessa forma uma maior quantidade de satélites e, conseqüentemente, de configurações geométricas, o que possibilita o aumento do grau de liberdade para a aplicação do *Screening*.

Por fim, as investigações quanto ao emprego dos sinais dos satélites Galileo (L1/L5) são bem parecidas com as apresentadas para a combinação L1/L5 do GPS, tanto em relação a pouca quantidade de satélites Galileo operantes e a escassez de estações que rastreiem tais satélites, como a disponibilidade de dados apenas a partir de março de 2013 e o atendimento dos valores de gradientes estimados para com o limite do *CONUS Threat Model*, com exceção do período das 0h às 2h TU (Figura 160). Os resultados obtidos para o sistema de posicionamento europeu são apresentados nas Figuras 156 a 167 e nas Tabelas 24 e 25.

Figura 156 – Gradientes ionosféricos em função da elevação referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

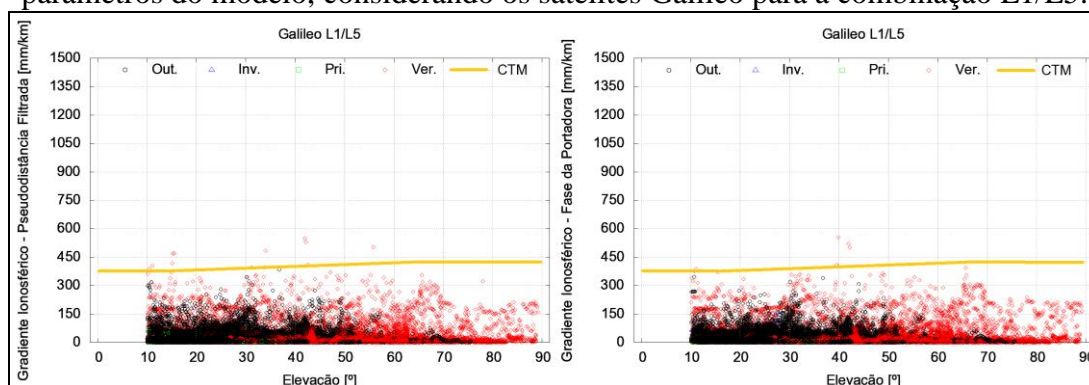


Figura 157 – Gradientes ionosféricos em função da velocidade da frente referente à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

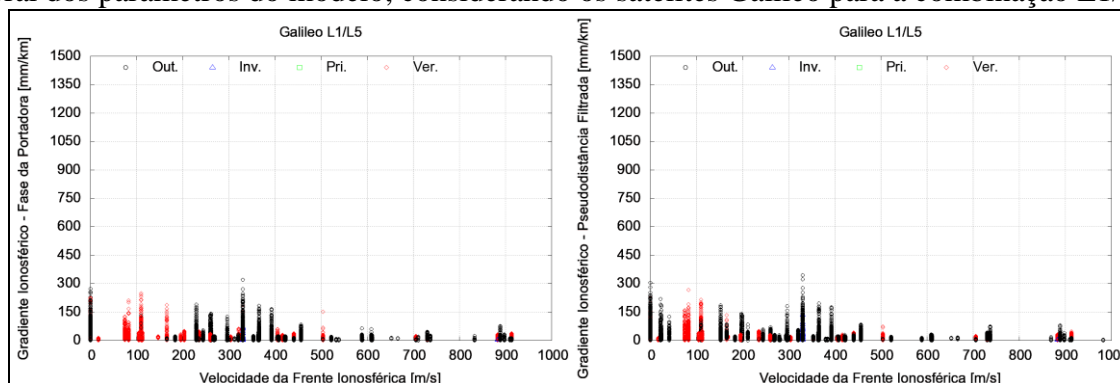


Figura 158 – Gradientes ionosféricos em função da extensão da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

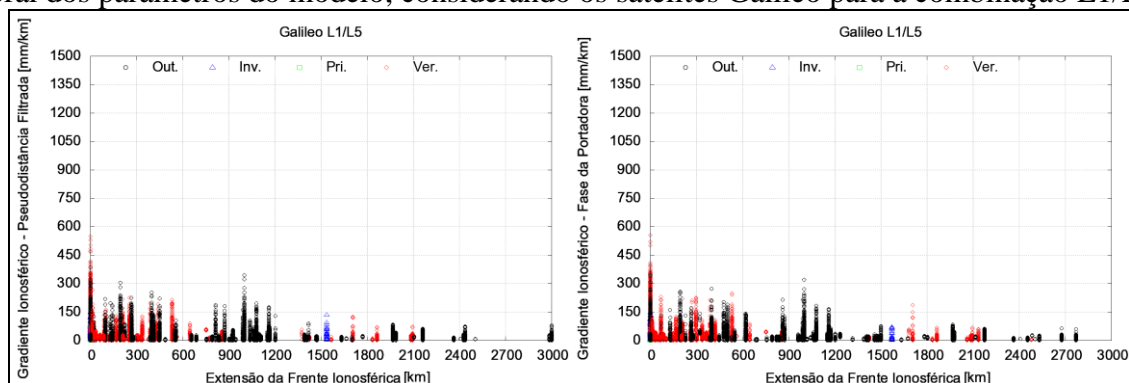


Figura 159 – Gradientes ionosféricos em função da direção da frente referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

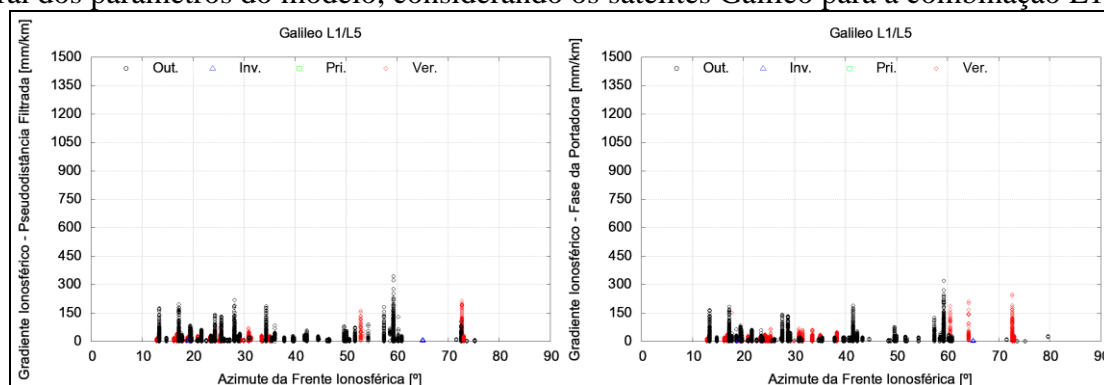


Figura 160 – Gradientes ionosféricos em função do tempo universal referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

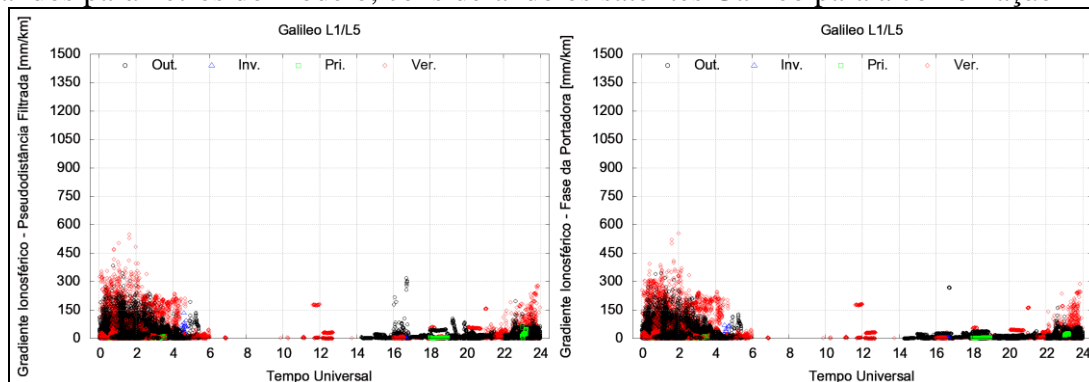


Figura 161 – Gradientes ionosféricos em função do ano referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

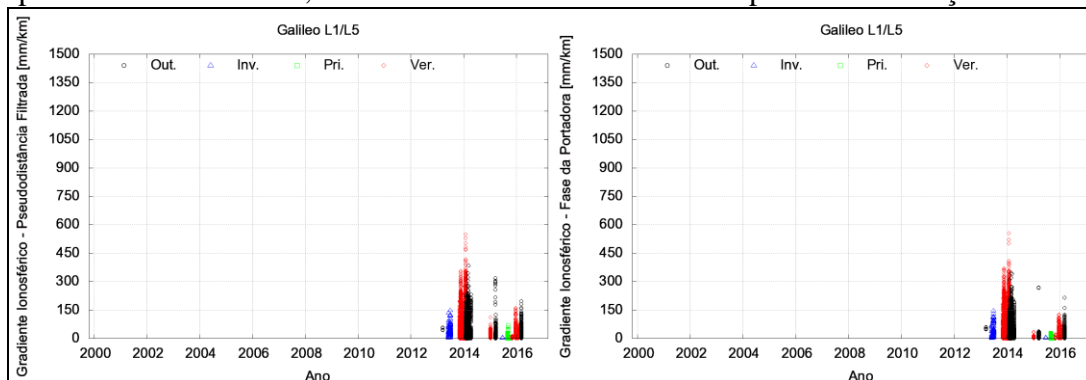


Figura 162 – Gradientes ionosféricos em função do azimute do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

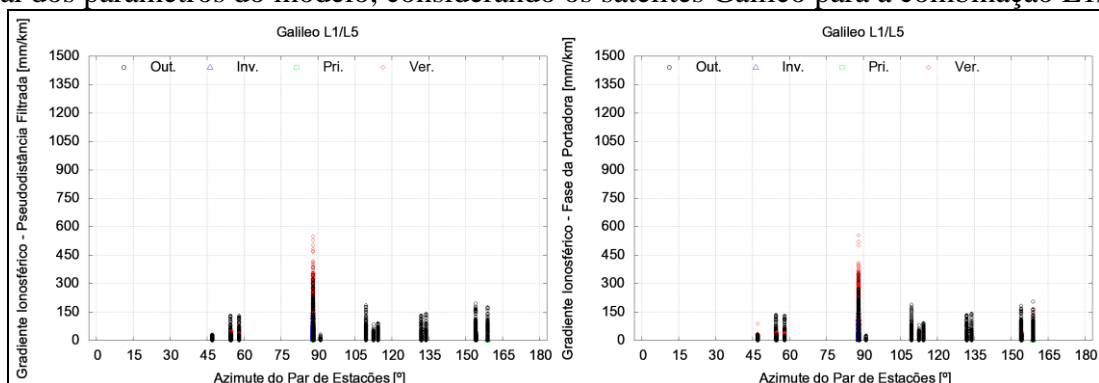


Figura 163 – Gradientes ionosféricos em função da distância do par referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

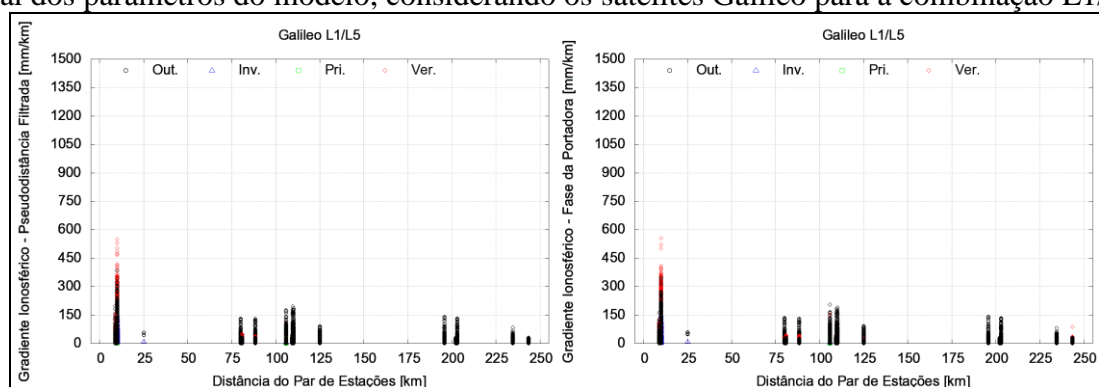


Figura 164 – Gradientes ionosféricos em função da latitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

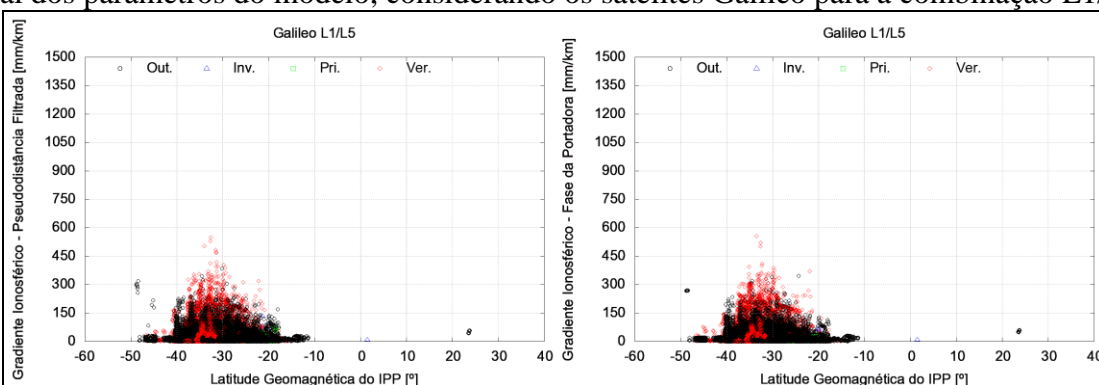


Figura 165 – Gradientes ionosféricos em função da longitude do IPP referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

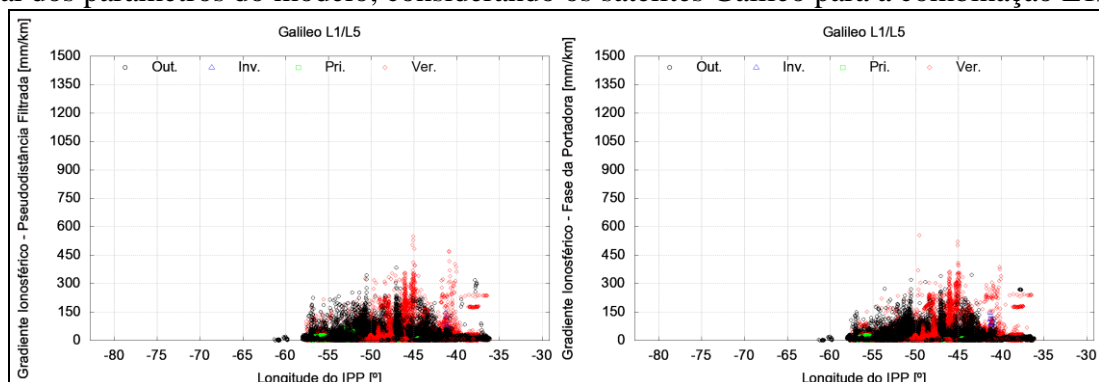


Figura 166 – Gradientes ionosféricos em função do satélite referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

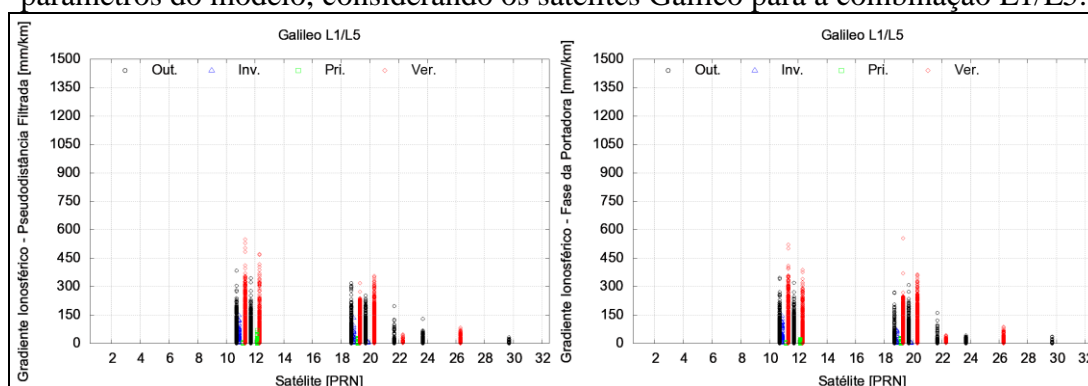


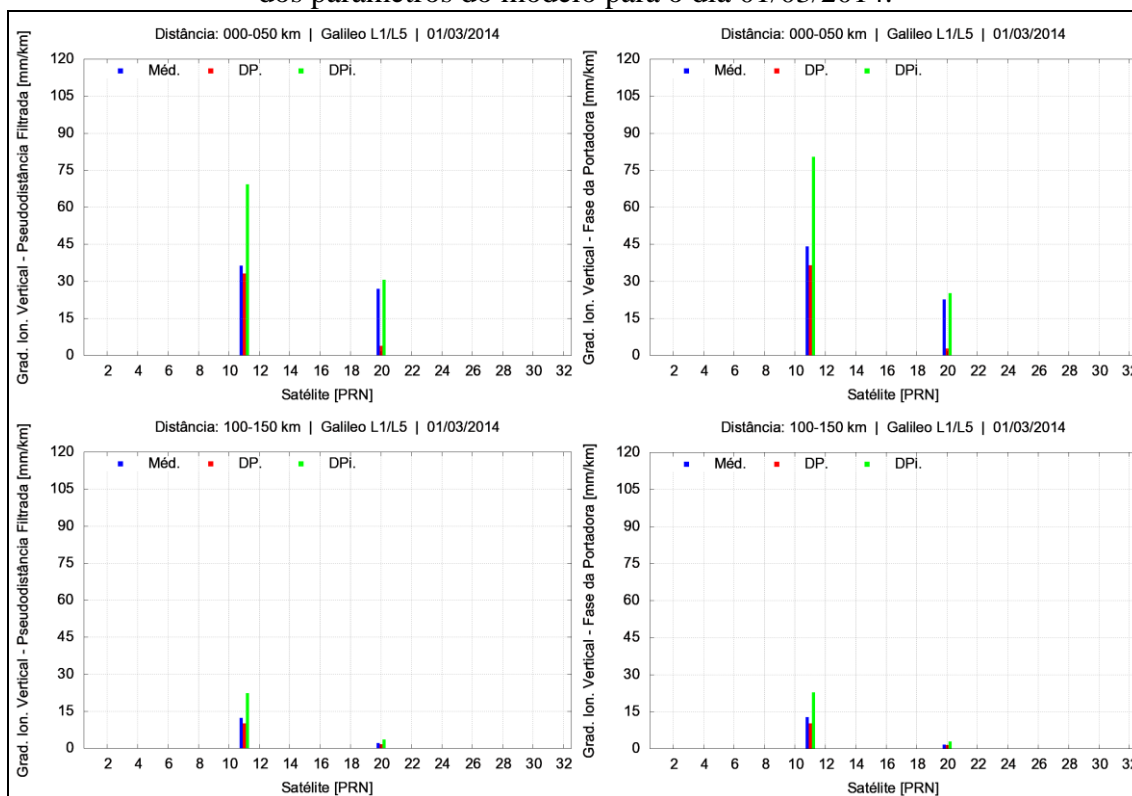
Tabela 24 – Maiores gradientes ionosféricos (pseudodistância filtrada) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,633	549,701	41,971
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,625	529,187	42,168
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,058	503,031	55,797
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,975	484,260	34,022
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	12	0,783	472,457	15,475
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	12	0,791	468,398	15,287
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	12	0,800	416,877	15,102
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,608	412,085	42,562
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	12	1,025	403,853	11,107
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	2,100	396,665	31,186

Tabela 25 – Maiores gradientes ionosféricos (fase da portadora) referentes à estimativa geral dos parâmetros do modelo, considerando os satélites Galileo para a combinação L1/L5.

Ano-DOY	Par	Distância [km]	Azimute [°]	PRN	Hora [TU]	Gradiente [mm/km]	Elevação [°]
2014-028	SJCE-SJCU	9,921	88,022	19	2,008	555,314	39,860
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,633	521,569	41,971
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,625	500,438	42,168
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,733	409,054	39,619
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	1,725	399,890	39,814
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	11	0,416	393,102	65,621
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	12	1,025	387,594	11,107
2014-030	SJCE-SJCU	9,921	88,022	12	1,041	376,015	10,803
2013-326	SJCE-SJCU	9,921	88,022	19	2,166	369,371	15,390
2013-326	SJCE-SJCU	9,921	88,022	20	1,800	363,579	48,810

Figura 167 – Valores de μ_{vig} , σ_{vig} e σ_{vig_infla} para os satélites Galileo obtidos a partir da combinação L1/L5 dos blocos 0-50 km e 100-150 km, referentes aos pares da estimativa geral dos parâmetros do modelo para o dia 01/03/2014.



A única diferença em relação aos satélites GPS (L1/L5) encontra-se no tamanho da região para qual se obteve os gradientes ionosféricos. No presente caso é restrito apenas à região Sudeste, conforme se pode visualizar nas Figuras 164 e 165, o que acarreta na obtenção de gradientes oriundos de irregularidades ionosféricas relacionadas à crista sul da AIE.

Assim, embora os resultados iniciais indiquem uma melhoria na obtenção dos gradientes ionosféricos, realça-se a necessidade de utilização de um conjunto mais amplo de dias, bem como, o emprego de mais estações capazes de rastrear os sinais Galileo, com o intuito de representar com fidedignidade todos os efeitos ionosféricos atuantes no território brasileiro.

6.5 Estimativa do σ_{vig} em Tempo Real para os Aeroportos SBGR, SBGL, SBBR, SBPA e SBRF a Partir de Medidas de Pseudodistância Filtrada pela Fase da Portadora

A determinação do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical em tempo real, utilizando medidas de pseudodistância filtrada pela fase, tem o intuito de verificar quais

são os satélites GPS e GLONASS que atendem o limiar do *CONUS Threat Model* (4 mm/km) em cada bloco de distância entre o GBAS e a aeronave, uma vez que a atual configuração do Sistema de Aumento baseado em estações terrestres consiste na transmissão de um único valor de σ_{vig} para todos os satélites visíveis e independentemente da distância. Tais valores em tempo real também podem ser utilizados para a determinação dos níveis de proteção VPL e HPL da aeronave, sendo aplicada nesse caso a técnica *Screening*, isto é, considerar apenas os satélites cujos desvios-padrão são menores que 4 mm/km, ou por meio da ponderação das observáveis GNSS dos satélites no modelo estocástico.

Assim, foram estimados valores de σ_{vig} em tempo real para cada um dos satélites visíveis dos cinco aeroportos selecionados na pesquisa (SBGR, SBGL, SBBR, SBPA e SBRF) para o dia 28 de fevereiro de 2018 ($K_p = 5,0$ e $D_{\text{st}} = -11$ nT), durante o período das 20h30 TU às 22h30 TU (correspondente das 17h30 às 19h30 local), considerando tanto a constelação GPS quanto GLONASS para a combinação L1/L2. Primeiramente são apresentados os resultados referentes ao aeroporto internacional do Rio de Janeiro, uma vez que há uma estação GBAS da Honeywell instalada próxima à pista, o que possibilita comparar os resultados obtidos para um determinado instante. Os valores dos DCB médios e os respectivos desvios-padrão das estações são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – DCB médios dos receptores e desvios-padrão referentes às estações para o caso do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 28/02/2018.

Estação	GPS L1/L2		GLONASS L1/L2	
	DCB médio	Desvio-Padrão	DCB médio	Desvio-Padrão
CEFE	35,037 ns	0,385 ns	7,030 ns	0,615 ns
EESC	21,326 ns	0,338 ns	4,087 ns	0,627 ns
GVA1	3,142 ns	0,489 ns	15,721 ns	0,640 ns
MGBH	40,019 ns	0,346 ns	7,684 ns	0,605 ns
MGIN	35,130 ns	0,693 ns	7,677 ns	0,864 ns
MGRP	-19,925 ns	0,399 ns	-14,307 ns	0,588 ns
MGV1	2,892 ns	0,553 ns	16,628 ns	0,597 ns
POLI	-11,142 ns	0,336 ns	-7,480 ns	0,611 ns
RIOD	20,227 ns	0,346 ns	5,460 ns	0,628 ns
RJCG	33,701 ns	0,392 ns	9,578 ns	0,633 ns
SJSP	8,251 ns	0,402 ns	-7,618 ns	0,649 ns
SPC1	-11,107 ns	0,366 ns	-9,866 ns	0,604 ns
SPFR	-18,089 ns	0,318 ns	-16,374 ns	0,599 ns
SPPI	0,708 ns	0,392 ns	14,623 ns	0,596 ns
SPS1	24,291 ns	0,317 ns	6,602 ns	0,674 ns
UBA1	-15,063 ns	0,394 ns	-15,124 ns	0,823 ns
VICO	16,621 ns	0,402 ns	-20,147 ns	0,743 ns

Constata-se pela Tabela 26 que todos os receptores GPS/GLONASS não possuem desvios-padrão maiores que 1 ns, o que permite a utilização de todas as estações para a formação dos pares.

A Figura 168 mostra a execução do programa em tempo real para dois instantes: 20h 50min 00s e 20h 50min 01s TU. Ressalta-se que os valores de σ_{vig} são nulos para o bloco 0-50 km devido à inexistência de pares de estações nessa faixa de quilometragem, e que há apenas os desvios-padrão para os gradientes ionosféricos verticais sem a aplicação das validações (“sv”), pois, como se trata de um período de declínio do ciclo solar 24 (Figura 18), em que as irregularidades ionosféricas são predominantemente classificadas como fracas, a validação automática inicial acaba excluindo todos os gradientes estimados. Diante desse cenário e visando apresentar e analisar os resultados em tempo real, são considerados os desvios-padrão dos gradientes sem as realizações das validações inicial e final propostas na seção 5.2.

Figura 168 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para dois instantes do dia 28/02/2018.

Sigma-VIG [mm/km] gIpF GPS e GLONASS L1/L2																		
Sat[PRN]	Dist 000-250 [km]			Dist 000-050 [km]			Dist 050-100 [km]			Dist 100-150 [km]			Dist 150-200 [km]			Dist 200-250 [km]		
	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf
G01	2.947	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.723	0.000	0.000	2.958	0.000	0.000	1.386	0.000	0.000	1.027	0.000	0.000
G03	3.221	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.349	0.000	0.000	2.852	0.000	0.000	1.340	0.000	0.000	1.575	0.000	0.000
G08	1.955	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.157	0.000	0.000	2.421	0.000	0.000	1.812	0.000	0.000	1.196	0.000	0.000
G10	1.428	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.052	0.000	0.000	1.695	0.000	0.000	0.742	0.000	0.000	0.916	0.000	0.000
G11	2.572	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.877	0.000	0.000	2.787	0.000	0.000	1.242	0.000	0.000	1.611	0.000	0.000
G14	2.131	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.596	0.000	0.000	2.507	0.000	0.000	1.014	0.000	0.000	1.319	0.000	0.000
G22	3.686	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.872	0.000	0.000	3.082	0.000	0.000	1.409	0.000	0.000	2.545	0.000	0.000
G23	1.928	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.199	0.000	0.000	1.442	0.000	0.000	1.078	0.000	0.000	0.916	0.000	0.000
G27	2.436	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.150	0.000	0.000	2.229	0.000	0.000	3.042	0.000	0.000	1.386	0.000	0.000
G31	3.670	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.019	0.000	0.000	2.598	0.000	0.000	1.258	0.000	0.000	0.766	0.000	0.000
G32	1.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.985	0.000	0.000	1.690	0.000	0.000	0.947	0.000	0.000	0.539	0.000	0.000
R03	2.328	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.784	0.000	0.000	1.185	0.000	0.000	1.817	0.000	0.000	1.974	0.000	0.000
R04	3.332	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.114	0.000	0.000	2.807	0.000	0.000	3.837	0.000	0.000	2.732	0.000	0.000
R05	1.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.525	0.000	0.000	0.259	0.000	0.000
R13	1.941	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.163	0.000	0.000	0.941	0.000	0.000	2.327	0.000	0.000
R14	4.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.255	0.000	0.000	6.168	0.000	0.000	2.672	0.000	0.000	2.582	0.000	0.000
R18	3.532	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.239	0.000	0.000	4.184	0.000	0.000	2.203	0.000	0.000	2.539	0.000	0.000
R19	5.895	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.646	0.000	0.000	2.401	0.000	0.000	2.510	0.000	0.000	2.230	0.000	0.000

20h 50min 00s (TU)

Sigma-VIG [mm/km] gIpF GPS e GLONASS L1/L2																		
Sat[PRN]	Dist 000-250 [km]			Dist 000-050 [km]			Dist 050-100 [km]			Dist 100-150 [km]			Dist 150-200 [km]			Dist 200-250 [km]		
	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf
G01	2.963	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.763	0.000	0.000	2.963	0.000	0.000	1.387	0.000	0.000	1.029	0.000	0.000
G03	3.225	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.357	0.000	0.000	2.853	0.000	0.000	1.342	0.000	0.000	1.574	0.000	0.000
G08	1.960	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.172	0.000	0.000	2.422	0.000	0.000	1.815	0.000	0.000	1.198	0.000	0.000
G10	1.434	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.071	0.000	0.000	1.692	0.000	0.000	0.742	0.000	0.000	0.921	0.000	0.000
G11	2.575	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.882	0.000	0.000	2.788	0.000	0.000	1.241	0.000	0.000	1.611	0.000	0.000
G14	2.131	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.571	0.000	0.000	2.516	0.000	0.000	1.016	0.000	0.000	1.322	0.000	0.000
G22	3.685	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.869	0.000	0.000	3.082	0.000	0.000	1.408	0.000	0.000	2.548	0.000	0.000
G23	1.931	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.200	0.000	0.000	1.441	0.000	0.000	1.084	0.000	0.000	0.820	0.000	0.000
G27	2.435	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.150	0.000	0.000	2.235	0.000	0.000	3.039	0.000	0.000	1.390	0.000	0.000
G31	3.678	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.031	0.000	0.000	2.605	0.000	0.000	1.264	0.000	0.000	0.768	0.000	0.000
G32	1.087	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.013	0.000	0.000	1.693	0.000	0.000	0.949	0.000	0.000	0.539	0.000	0.000
R03	2.317	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.765	0.000	0.000	1.113	0.000	0.000	1.818	0.000	0.000	1.972	0.000	0.000
R04	3.330	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.112	0.000	0.000	2.809	0.000	0.000	3.834	0.000	0.000	2.732	0.000	0.000
R05	4.371	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.191	0.000	0.000	3.283	0.000	0.000	4.236	0.000	0.000
R13	1.936	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.138	0.000	0.000	0.941	0.000	0.000	2.322	0.000	0.000
R14	4.322	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.764	0.000	0.000	6.439	0.000	0.000	2.744	0.000	0.000	2.560	0.000	0.000
R18	3.529	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.227	0.000	0.000	4.177	0.000	0.000	2.199	0.000	0.000	2.539	0.000	0.000
R19	5.895	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.652	0.000	0.000	2.404	0.000	0.000	2.505	0.000	0.000	2.230	0.000	0.000

20h 50min 01s (TU)

A partir dos resultados da Figura 168 tem-se que, para o instante 20h 50min 00s TU, são poucos os satélites GPS e GLONASS que superam o limiar do modelo norte-americano. Particularizando para cada bloco de distância, a aeronave poderia utilizar qualquer um dos 11 satélites GPS ou 7 satélites GLONASS das distâncias 150-200 km e 200-250 km

para a determinação dos níveis de proteção; para o bloco 100-150 km não seriam utilizados os satélites GLONASS R14 e R18, pois apresentam um σ_{vig} de 6,168 mm/km e 4,184 mm/km, respectivamente, ou os mesmos seriam mantidos na determinação do VPL e HPL desde que as observáveis sejam ponderadas no modelo estocástico; já para as distâncias entre 50 e 100 km, os satélites GPS triados para a determinação do HPL e VPL seriam os de PRN 08, 10, 11, 14, 23, 27 e 32, totalizando 7 satélites que, com a adição dos satélites GLONASS R03 (2,784 mm/km), R04 (0,114 mm/km) e R14 (1,255 mm/km), elevaria para 10 o total de satélites habilitados para a aproximação precisa da aeronave, ou, conforme apresentado anteriormente, observáveis de tais satélites teriam peso maior em detrimento aos que superaram o limite do *CONUS Threat Model*.

Para verificar se as estimativas do desvio-padrão em tempo real para cada satélite estão condizentes foi obtida a mensagem GBAS Tipo 1 da estação do aeroporto SBGL, para às 20h50 TU do dia 28 de fevereiro de 2018 (Figura 169), a qual contém o parâmetro de integridade referente a decorrelação ionosférica (*Sigma Vig*).

Figura 169 – Mensagem GBAS Tipo 1 da estação do aeroporto SBGL para às 20h50 TU do dia 28/02/2018.

Week No: 1990 TOW: 334200 Sigma Vig: 0.000014											
Satellite Vehicle	Elevation (deg)	Azimuth (deg)	Pseudorange Corrections (m)	Pseudorange Corrections 30 (m)	Sig_PR_Gnd	Sig_PR_Gnd 30	B-Value 1	B-Value 2	B-Value 3	B-Value 4	
1	32.387	216.131	-3.300	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
3	16.781	241.641	1.500	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
8	34.773	301.784	-1.760	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
10	19.247	105.600	-0.370	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
11	40.410	234.739	-3.550	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
14	56.728	158.433	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	31.477	228.024	-1.920	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
23	11.892	304.110	13.240	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
27	22.065	344.628	2.080	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
31	48.884	65.220	-2.790	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
32	32.358	145.505	-3.120	-	0.220	-	0.00	-6.40	0.00	0.00	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tracked and GND corrections

GND corrections, but not tracked

Tracked and No GND corrections

In View, but not tracked and no GND corrections

Fonte: <http://laas.tc.faa.gov/Brazil_Graph.html>. Acesso em: 28 fev. 2018.

De acordo com a mensagem checa-se que o valor de σ_{vig} transmitido pelo GBAS é de 0,000014 m/m para o GPS, equivalente a 14 mm/km, valor esse superior a cada um dos desvios-padrão estimados em tempo real para o instante. Realizando a média dos valores de σ_{vig} dos satélites GPS para o bloco 0-250 km da Figura 168, com o objetivo de obter um único valor de desvio-padrão para todos os satélites visíveis e independentemente da

distância, obtém-se $2,459 \pm 0,861$ mm/km, bem como $3,064 \pm 1,394$ mm/km para o GLONASS. Tais valores indicam que, para o instante e dia em análise, há a possibilidade de se realizar a aproximação e pouso preciso no aeroporto SBGL.

Em relação ao aeroporto internacional de São Paulo (SBGR) tem-se que os resultados são semelhantes com os apresentados para o aeroporto SBGL, sendo agora considerado o instante 21h 16min 07s TU (Figura 170). Constata-se que são poucos os satélites GPS e GLONASS que superam o limiar do *CONUS Threat Model*, sendo a frequência de exclusão dos satélites pela técnica *Screening* maior à medida que a distância entre a estação GBAS e a aeronave diminui. Um fato interessante a destacar trata-se da estação UFPR, que apresentou desvio-padrão do DCB médio superior a 1 ns tanto para os sinais GPS quanto GLONASS (L1/L2), conforme apresenta a Tabela 27, o que conduziu a desconsideração da estação na formação dos pares.

Tabela 27 – DCB médios dos receptores e desvios-padrão referentes às estações para o caso do aeroporto SBGR, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 28/02/2018.

Estação	GPS L1/L2		GLONASS L1/L2	
	DCB médio	Desvio-Padrão	DCB médio	Desvio-Padrão
EESC	21,326 ns	0,338 ns	4,087 ns	0,627 ns
MGBH	40,019 ns	0,346 ns	7,684 ns	0,605 ns
MGIN	35,130 ns	0,693 ns	7,677 ns	0,864 ns
MGRP	-19,925 ns	0,399 ns	-14,307 ns	0,588 ns
MGV1	2,892 ns	0,553 ns	16,628 ns	0,597 ns
NEIA	-26,019 ns	0,349 ns	-24,333 ns	0,584 ns
POLI	-11,142 ns	0,336 ns	-7,480 ns	0,611 ns
RIOD	20,227 ns	0,346 ns	5,460 ns	0,628 ns
SJRP	-22,075 ns	0,315 ns	-27,629 ns	0,583 ns
SJSP	8,251 ns	0,402 ns	-7,618 ns	0,649 ns
SPAR	-15,310 ns	0,320 ns	-11,072 ns	0,521 ns
SPC1	-11,107 ns	0,366 ns	-9,866 ns	0,604 ns
SPFR	-18,089 ns	0,318 ns	-16,374 ns	0,599 ns
SPJA	-15,908 ns	0,964 ns	-10,134 ns	0,818 ns
SPLI	-17,084 ns	0,325 ns	-16,222 ns	0,553 ns
SPPI	0,708 ns	0,392 ns	14,623 ns	0,596 ns
SPS1	24,291 ns	0,317 ns	6,602 ns	0,674 ns
SPTU	-10,152 ns	0,293 ns	-8,526 ns	0,531 ns
UBA1	-15,063 ns	0,394 ns	-15,124 ns	0,823 ns
UFPR	30,453 ns	8,119 ns	2,057 ns	1,291 ns
VICO	16,621 ns	0,402 ns	-20,147 ns	0,743 ns

Em contrapartida e para fins de verificação foram determinados σ_{vig} para o aeroporto SBGL para o dia 1 de março de 2014 (ciclo solar 24/ápice/outono) empregando o mesmo método implementado em tempo real, com a diferença de, ao invés de utilizar o BNC para a transmissão das observáveis GNSS das estações, foram obtidos os arquivos RINEX diretamente no FTP (*File Transfer Protocol*) do IBGE. Com base nos mapas do índice I_{ROT} apresentados na Figura 174 determinou-se os valores de desvio-padrão do gradiente ionosférico para o período das 1h45 às 2h TU, período esse em que ocorreram as mais intensas irregularidades ionosféricas na região circundante do aeroporto internacional do Rio de Janeiro. Assim, a Figura 175 apresenta, por exemplo, os valores de σ_{vig} “sv”, “vi” e “vf” para cada satélite disponível para o instante 1h 51min 45s TU.

Figura 174 – Mapas do índice I_{ROT} (0h-3h TU) para os satélites GPS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.

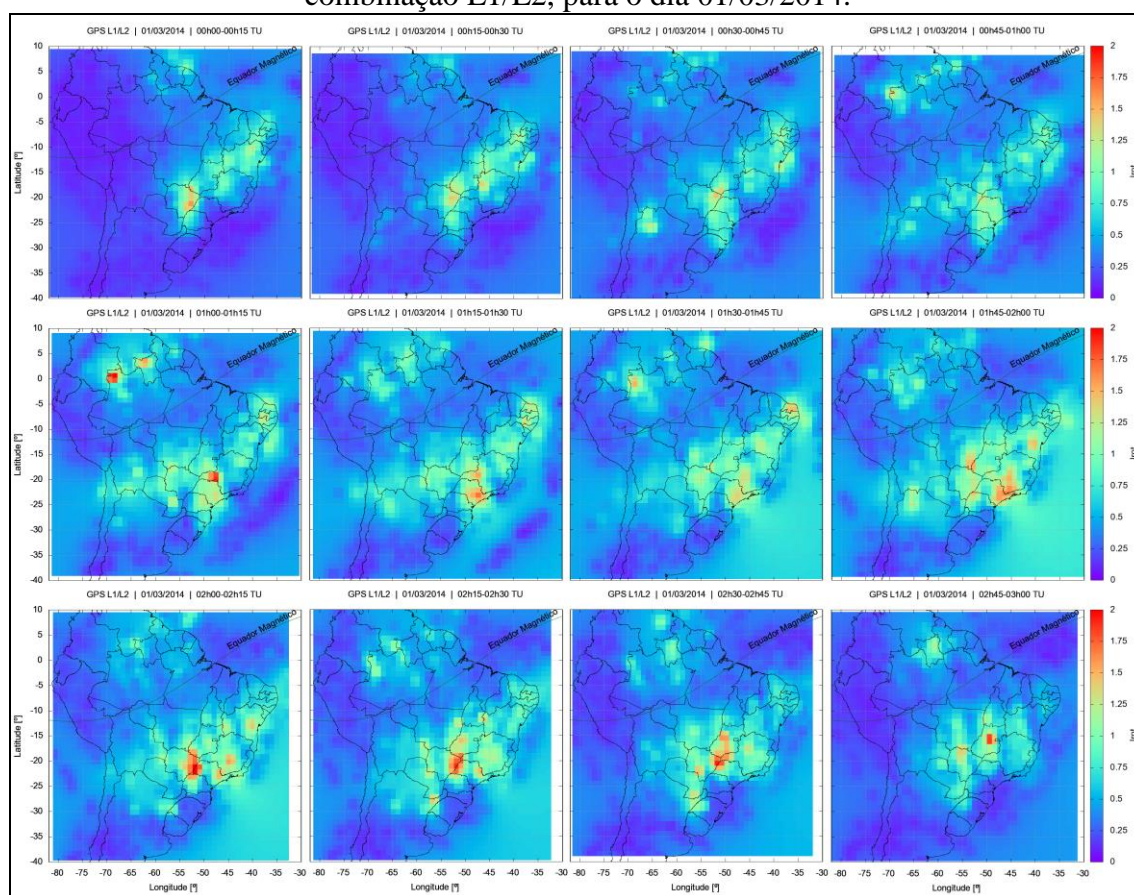


Figura 175 – Tela do MoR_Ion_TR referente ao caso do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS na combinação L1/L2, para o instante 1h 51min 45s TU do dia 01/03/2014.

Sat[PRN]	Dist 000-250 [km]			Dist 000-050 [km]			Dist 050-100 [km]			Dist 100-150 [km]			Dist 150-200 [km]			Dist 200-250 [km]		
	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf	sv	vi	vf
G01	11.774	13.216	13.216	0.000	0.000	0.000	4.323	2.981	2.981	18.407	28.177	28.177	13.201	13.816	13.816	8.264	8.096	8.096
G11	19.428	18.958	18.958	0.000	0.000	0.000	23.542	0.000	0.000	17.602	17.252	17.252	26.578	18.734	18.734	15.082	16.759	16.759
G19	19.600	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6.775	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.451	0.000	0.000
G20	7.367	6.321	6.321	0.000	0.000	0.000	3.582	0.000	0.000	8.100	0.000	0.000	5.548	0.000	0.000	6.951	0.000	0.000
G23	10.177	5.057	5.057	0.000	0.000	0.000	13.928	0.000	0.000	13.336	0.000	0.000	11.247	4.199	4.199	8.125	4.913	4.913
G31	7.035	7.461	7.461	0.000	0.000	0.000	5.004	5.004	5.004	10.556	13.262	13.262	5.333	5.333	5.333	6.760	7.092	7.092
G32	12.130	13.087	13.087	0.000	0.000	0.000	19.360	19.360	19.360	10.908	8.113	8.113	8.028	8.028	8.028	5.522	6.724	6.724
R03	5.732	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.731	0.000	0.000	3.471	0.000	0.000	5.360	0.000	0.000	3.937	0.000	0.000
R04	8.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.415	0.000	0.000	10.133	0.000	0.000	8.991	0.000	0.000	4.045	0.000	0.000
R13	5.750	5.600	5.600	0.000	0.000	0.000	8.839	9.539	9.539	4.019	4.866	4.866	6.287	0.000	0.000	2.709	4.240	4.240
R14	14.506	15.110	15.110	0.000	0.000	0.000	26.461	26.461	26.461	7.771	7.314	7.314	5.088	5.088	5.088	8.313	11.168	11.168
R15	13.035	13.035	13.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	14.988	14.988	14.988	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
R19	9.163	7.316	7.316	0.000	0.000	0.000	16.147	15.896	15.896	8.827	0.712	0.712	6.001	10.242	10.242	3.045	2.549	2.549

01:51:45
quarta-feira, 27 de março

março de 2018

D	S	T	Q
25	26	27	28
4	5	6	7
11	12	13	14

== 01h 51min 45s (TU) ==

Observam-se pela Figura 175 que, para o dia em análise, foram poucos os satélites GPS e GLONASS que atenderam o limiar do modelo do CONUS após a validação final, tais como o G01 para o bloco 50-100 km (2,981 mm/km) e o R19 dos blocos 100-150 km (0,712 mm/km) e 200-250 km (2,549 km), o que evidencia a forte influência das perturbações na camada ionosférica na estimativa do σ_{vig} .

Uma vez que há muitos satélites cujas observáveis proporcionaram valores de σ_{vig} superior a 4 mm/km, a aplicação da técnica *Screening* é inviabilizada, devido ao baixo grau de liberdade. Uma alternativa é realizar a ponderação das observáveis no modelo estocástico para a determinação de VPL e HPL, atribuindo pesos inversamente proporcionais aos valores de σ_{vig} .

Um fato interessante a destacar trata-se dos satélites cujo alinhamento com as estações terrestres não atravessaram as frentes ionosféricas, como por exemplo, os satélites G11, G20, G23, R03 e R04 rastreados pelas estações pertencentes ao bloco de distância entre 50 e 100 km. Verifica-se que os desvios-padrão dos gradientes “sv” não puderam ser validados inicialmente, pois os índices de irregularidades para tais geometrias de satélites/estações foram classificados como fracos, ao contrário das demais geometrias. Dessa forma, e considerando os gradientes sem validação, há um aumento da disponibilidade de satélites para a realização da aproximação e pouso preciso.

A implementação em tempo real da estimativa do σ_{vig} , tomando como exemplo os resultados do aeroporto SBGL para o dia 1 de março de 2014, apresentou ser válida quando comparado com as determinações pós-processadas, em que a média de σ_{vig} em ambas as modalidades foi de 10 mm/km.

6.6 Estimativa dos Níveis de Proteção em Tempo Real para a Aproximação e Pouso Preciso no Aeroporto SBGL a Partir de Dados do GBAS, de Aeronave e do σ_{vig}

Com o intuito de avaliar os parâmetros local-temporais do modelo do CONUS obtidos para o aeroporto SBGL (subseção 6.3.2), em que se analisou que o GBAS pode provavelmente ser utilizado para uma aproximação precisa, independente do horário, durante o período do inverno, com exceção das janelas entre 23h e 24h TU da primavera e entre 21h e 24h TU do verão e quando a elevação dos satélites não está compreendida de 10° a 37° no outono, realizaram-se estimativas de VPL e HPL em tempo real da aeronave, comparando-as com os valores de VAL e HAL estabelecidos pela ICAO.

Duas datas e períodos de horas foram analisados: 23 de abril de 2018 (outono), das 23h 15min 09s às 23h 42min 40s TU, e 10 de maio de 2018 (inverno de acordo com a Tabela 16), das 20h 07min 18s às 20h 34min 49s TU.

Para a aproximação da aeronave até o pouso no aeroporto SBGL foram utilizados como exemplo os dados de latitude, longitude, altitude, azimute e velocidade de um voo comercial da TAM, realizado no dia 12 de março de 2018, que partiu do aeroporto internacional de Recife (SBRF). Tais dados e de outros voos podem ser acessados no *website* da FlightAware (<https://pt.flightaware.com/>). A Tabela 28 apresenta mais informações do voo supracitado e as Figuras 176 e 177 a trajetória dos últimos 250 km de voo.

Tabela 28 – Informações do voo utilizado como exemplo para a estimativa dos níveis de proteção para a aproximação e pouso preciso no aeroporto SBGL.

Voo	TAM/JJ3839
Data	12 de março de 2018
Aeronave	Airbus A321 (Bimotor a Jato)
Origem	Aeroporto internacional de Recife/PE (SBRF)
Horário de Partida	6h 28min 23s TU
Destino	Aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ (SBGL)
Horário de Chegada	8h 57min 34s TU

Fonte: <<https://pt.flightaware.com/live/flight/TAM3839/history/20180312/0922Z/SBRF/SBGL/tracklog>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

Figura 176 – Trajetória dos últimos 250 km do voo TAM/JJ3839, realizado no dia 12/03/2018, partindo do aeroporto SBRF e com destino ao aeroporto SBGL.

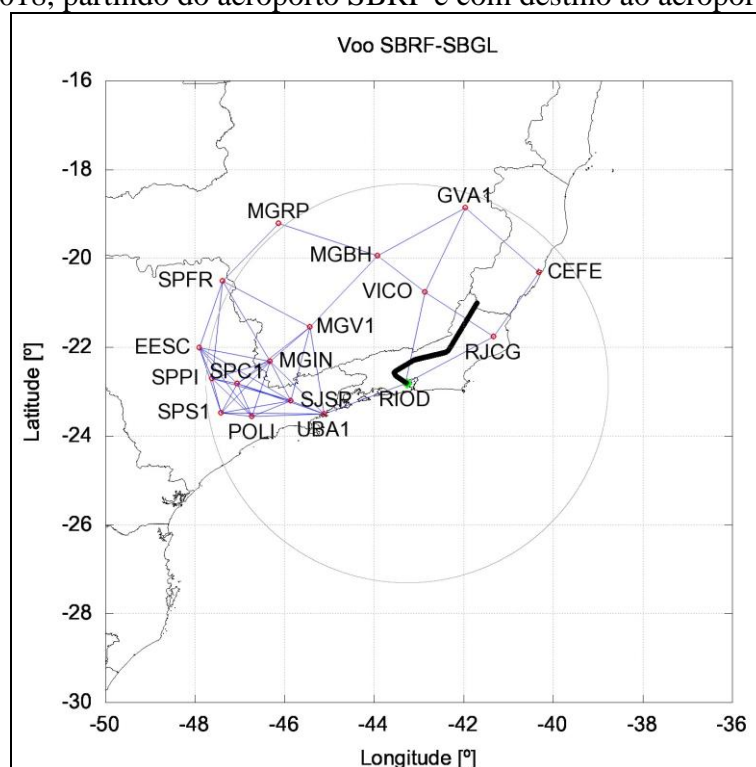
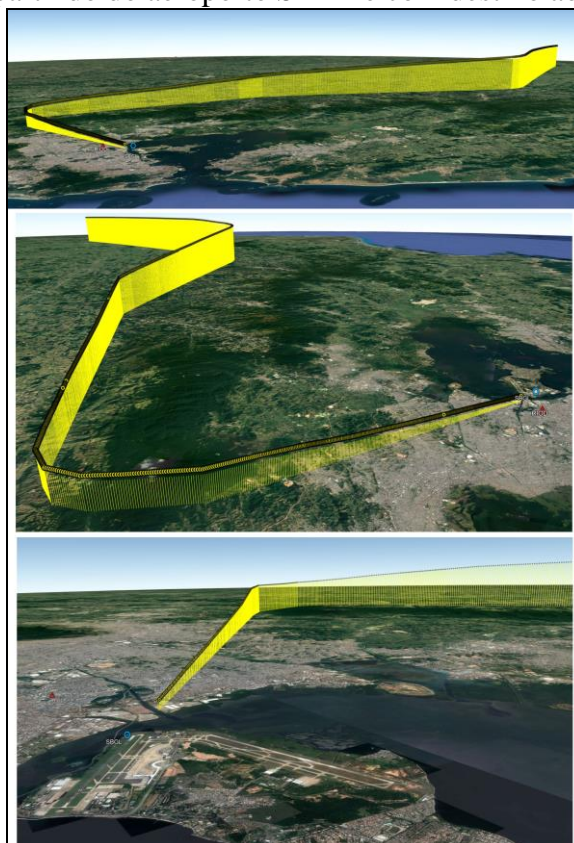


Figura 177 – Trajetória tridimensional dos últimos 250 km do voo TAM/JJ3839, realizado no dia 12/03/2018, partindo do aeroporto SBRF e com destino ao aeroporto SBGL.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Os valores de σ_{vig} para os satélites GPS e GLONASS (L1/L2) foram estimados em tempo real pelo MoR_Ion_TR utilizando as estações compreendidas em um raio de 500 km em relação à localização do aeroporto, e considerando uma distância máxima de 250 km entre as estações para a formação dos pares, conforme apresenta a Figura 176. Tais valores de desvios-padrão foram obtidos tanto para blocos de distâncias de 50 em 50 km, quanto independentemente da distância (denominado de geral), ou seja, considerando todos os pares de estações de 0 a 250 km.

O cálculo da variância da pseudodistância de cada satélite visível (σ_{PD}^2), dada pela equação (30), foi realizado utilizando os erros devido à aeronave, à troposfera, à ionosfera e à estação apresentados nas subseções 4.1.1 a 4.1.4. Destaca-se que para o erro devido a camada troposférica, a incerteza do índice de refração (σ_N) e a altura da camada troposférica (h_0) foram extraídos da mensagem GBAS Tipo 2, sendo iguais a 15 (adimensional) e 12.900 m, respectivamente, para ambas as datas em análise. Em relação ao erro devido à ionosfera considerou-se para o raio médio da Terra (R_m) o valor de 6.371 km, 350 km para a altura da camada ionosférica (h_m), a distância inclinada entre a aeronave e a estação GBAS (X_{aeronave}), para cada instante do voo, foi obtida a partir das coordenadas tridimensionais do GBAS e da aeronave, e adotou-se 100 segundos para a constante do filtro de suavização (τ). Já para a estimativa do erro devido à estação foram obtidos valores considerando 2, 3 e 4 estações de referência operantes no GBAS. Tanto para o erro devido à aeronave quanto à estação foram considerados os parâmetros GAD-A e GAD-B.

Assim, a partir dos dados do GBAS, da aeronave e do σ_{vig} foi desenvolvido um programa auxiliar denominado SBGL_PL, derivado do MoR_Ion_TR, para o cálculo dos níveis de proteção horizontal e vertical, de acordo com a sequência de equações apresentadas na seção 4.1. Ressalta-se que foi considerado 3° para o ângulo de deslocamento para o caminho de aproximação final (θ_{GPA}) e 10° para a máscara de elevação dos satélites.

Foram obtidos valores de HPL e VPL utilizando somente satélites GPS, somente satélites GLONASS e combinando as duas constelações. Para cada uma das três possibilidades têm-se 72 tipos diferentes de valores de níveis de proteção devido à combinação das seguintes variantes:

- Categoria de aproximação e pouso preciso: CAT-I, CAT-II ou CAT-III;
- Número de estações de referência operantes no GBAS: 2, 3 ou 4;
- Tipo de GAD: A ou B;

- Estimativa do σ_{vig} em tempo real: em bloco ou geral; e
- Aplicação do *Screening* de 4 mm/km nos valores de σ_{vig} de cada satélite disponível: sim ou não.

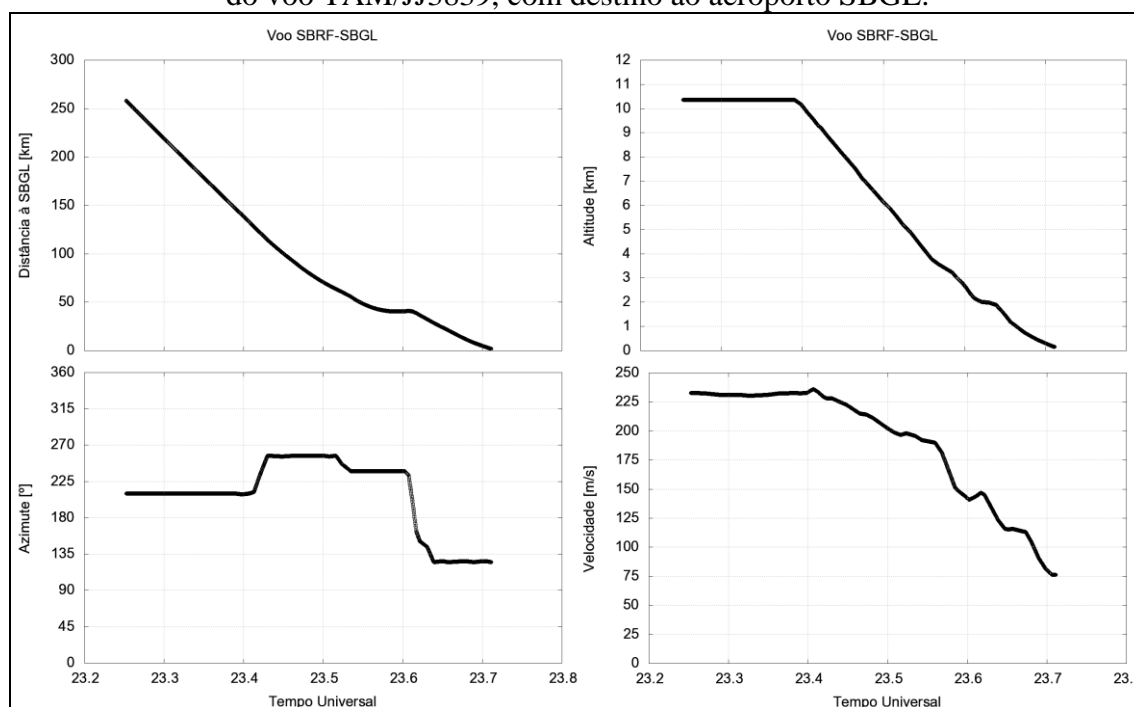
Dada a grande quantidade de informações a serem apresentadas em tempo real, são mostrados na tela do programa apenas os valores de VPL e HPL referentes a quatro estações de referência operantes no GBAS. Além dos níveis de proteção também são mostrados o número de satélites disponíveis para cada constelação (nSat), com e sem aplicação do *Screening*, e informações da aeronave, tais como: latitude, longitude, coordenadas tridimensionais geocêntricas (X, Y e Z), altitude, azimute, velocidade e distância até o GBAS. Os demais resultados para 2 e 3 estações operantes podem ser consultados nos arquivos de *log* gerados ao término da execução. A Figura 178 apresenta, por exemplo, a captura da tela do programa para o instante 23h 20min 30s TU (20h 20min 30s no horário local) do dia 23 de abril de 2018.

Figura 178 – Tela do SBGL_PL referente ao instante 23h 20min 30s TU do dia 23/04/2018.

		HPL [m]						VPL [m]					
		GPS	nSat	GLONASS	nSat	GPS+GLONASS	nSat	GPS	nSat	GLONASS	nSat	GPS+GLONASS	nSat
CAT-I	> 4 Est > GAD-A > Dist-Bloco > Screening-Nao	2.476	7	7.586	5	2.331	12	11.530	7	9.524	5	6.754	12
CAT-I	> 4 Est > GAD-A > Dist-Bloco > Screening-Sim	2.476	7	7.586	5	2.331	12	11.530	7	9.524	5	6.754	12
CAT-I	> 4 Est > GAD-A > Dist-Geral > Screening-Nao	3.695	7	9.691	5	3.394	12	15.954	7	13.498	5	8.499	12
CAT-I	> 4 Est > GAD-A > Dist-Geral > Screening-Sim	4.205	6	0.000	3	3.892	9	18.203	6	0.000	3	9.758	9
CAT-I	> 4 Est > GAD-B > Dist-Bloco > Screening-Nao	2.026	7	7.331	5	1.915	12	9.764	7	8.743	5	5.951	12
CAT-I	> 4 Est > GAD-B > Dist-Bloco > Screening-Sim	2.026	7	7.331	5	1.915	12	9.764	7	8.743	5	5.951	12
CAT-I	> 4 Est > GAD-B > Dist-Geral > Screening-Nao	3.379	7	9.468	5	3.125	12	14.556	7	12.991	5	7.852	12
CAT-I	> 4 Est > GAD-B > Dist-Geral > Screening-Sim	3.787	6	0.000	3	3.536	9	16.340	6	0.000	3	8.895	9
CAT-II	> 4 Est > GAD-A > Dist-Bloco > Screening-Nao	2.826	7	8.658	5	2.660	12	13.159	7	10.870	5	7.708	12
CAT-II	> 4 Est > GAD-A > Dist-Bloco > Screening-Sim	2.826	7	8.658	5	2.660	12	13.159	7	10.870	5	7.708	12
CAT-II	> 4 Est > GAD-A > Dist-Geral > Screening-Nao	4.217	7	11.060	5	3.873	12	18.208	7	15.405	5	9.700	12
CAT-II	> 4 Est > GAD-A > Dist-Geral > Screening-Sim	4.800	6	0.000	3	4.442	9	20.774	6	0.000	3	11.136	9
CAT-II	> 4 Est > GAD-B > Dist-Bloco > Screening-Nao	2.312	7	8.367	5	2.185	12	11.143	7	9.978	5	6.792	12
CAT-II	> 4 Est > GAD-B > Dist-Bloco > Screening-Sim	2.312	7	8.367	5	2.185	12	11.143	7	9.978	5	6.792	12
CAT-II	> 4 Est > GAD-B > Dist-Geral > Screening-Nao	3.857	7	10.805	5	3.566	12	16.612	7	14.826	5	8.961	12
CAT-II	> 4 Est > GAD-B > Dist-Geral > Screening-Sim	4.322	6	0.000	3	4.035	9	18.649	6	0.000	3	10.151	9
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-A > Dist-Bloco > Screening-Nao	2.826	7	8.658	5	2.660	12	13.159	7	10.870	5	7.708	12
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-A > Dist-Bloco > Screening-Sim	2.826	7	8.658	5	2.660	12	13.159	7	10.870	5	7.708	12
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-A > Dist-Geral > Screening-Nao	4.217	7	11.060	5	3.873	12	18.208	7	15.405	5	9.700	12
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-A > Dist-Geral > Screening-Sim	4.800	6	0.000	3	4.442	9	20.774	6	0.000	3	11.136	9
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-B > Dist-Bloco > Screening-Nao	2.312	7	8.367	5	2.185	12	11.143	7	9.978	5	6.792	12
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-B > Dist-Bloco > Screening-Sim	2.312	7	8.367	5	2.185	12	11.143	7	9.978	5	6.792	12
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-B > Dist-Geral > Screening-Nao	3.857	7	10.805	5	3.566	12	16.612	7	14.826	5	8.961	12
CAT-IIIb	> 4 Est > GAD-B > Dist-Geral > Screening-Sim	4.322	6	0.000	3	4.035	9	18.649	6	0.000	3	10.151	9

Invariavelmente da escolha da data para a estimativa dos níveis de proteção, a evolução temporal da aeronave em termos de distância até o GBAS, da altitude, do azimute e da velocidade é a mesma, haja vista que se trata da utilização dos dados de um mesmo voo em diferentes dias e períodos. Isso permite que apenas a geometria dos satélites e as condições troposféricas e ionosféricas sejam as variáveis atuantes nas estimativas, possibilitando assim comparações e análises entre datas. A Figura 179 ilustra a variação temporal da aeronave em termos de distância à SBGL, altitude, azimute e velocidade.

Figura 179 – Distância, altitude, azimute e velocidade da aeronave durante os últimos 250 km do voo TAM/JJ3839, com destino ao aeroporto SBGL.



Nota-se pela Figura 179 que a aeronave inicia o procedimento de aproximação por volta das 23,4h TU, isto é, há 20 minutos ou 150 km de distância do aeroporto, momento em que a altitude e a velocidade começam a ser reduzidas e há um deslocamento a sudoeste.

As Figuras 180 a 185 apresentam os resultados de VPL e HPL, bem como o número de satélites disponíveis, para o procedimento do dia 23 de abril de 2018 considerando os parâmetros GAD-A. As Figuras 180, 182 e 184 correspondem aos valores para CAT-I, CAT-II e CAT-III, respectivamente, considerando a estimativa do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical em intervalos de distância de 50 km, ao passo que as Figuras 181, 183 e 185 também correspondem aos valores de CAT-I, CAT-II e CAT-III, mas com σ_{vig} determinado sem distinção de distância. Em todas as figuras do lado esquerdo são apresentados os resultados sem o *Screening*, já as figuras do lado direito são os resultados da exclusão dos satélites que apresentaram σ_{vig} superior a 4 mm/km. Ressalta-se que os níveis de proteção são nulos para o bloco 0-50 km devido à inexistência de pares de estações nessa faixa de quilometragem. Já a Figura 186 apresenta a elevação dos satélites GPS e GLONASS disponíveis em função do tempo universal, bem como os respectivos *skyplots*.

Figura 180 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e aplicação ou não do *Screening*.

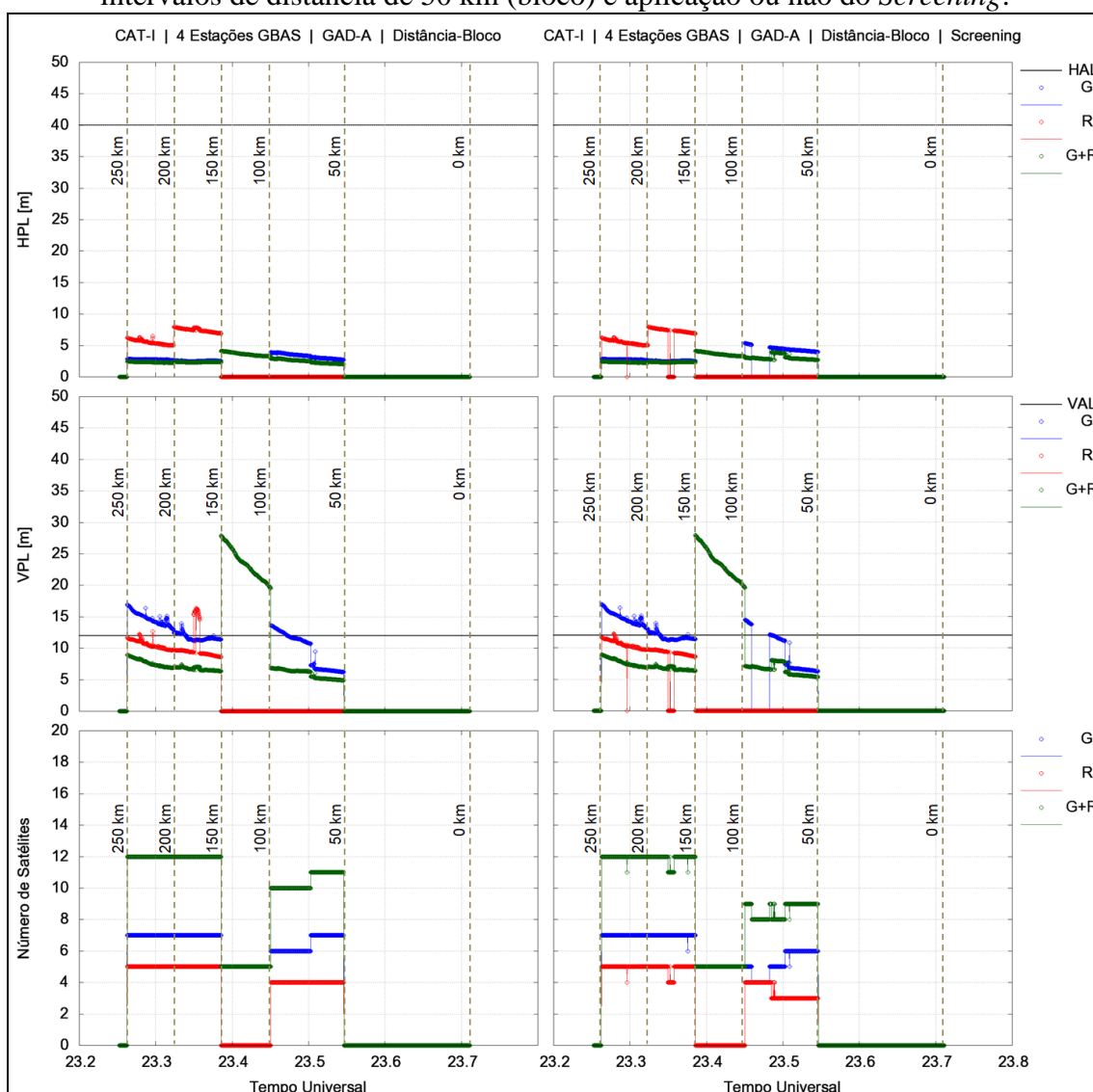


Figura 181 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} sem distinção de distância (geral) e aplicação ou não do *Screening*.

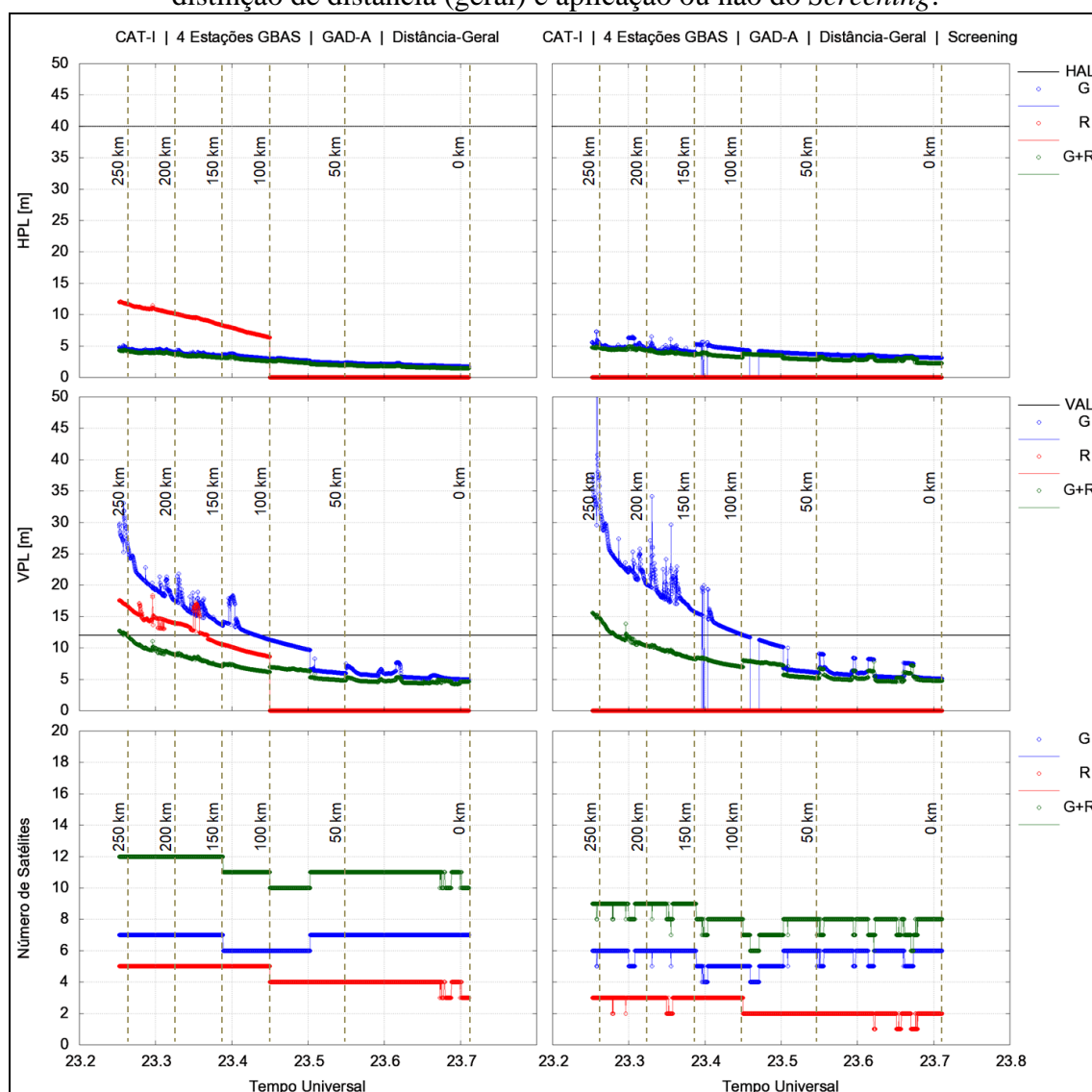


Figura 182 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-II no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e aplicação ou não do *Screening*.

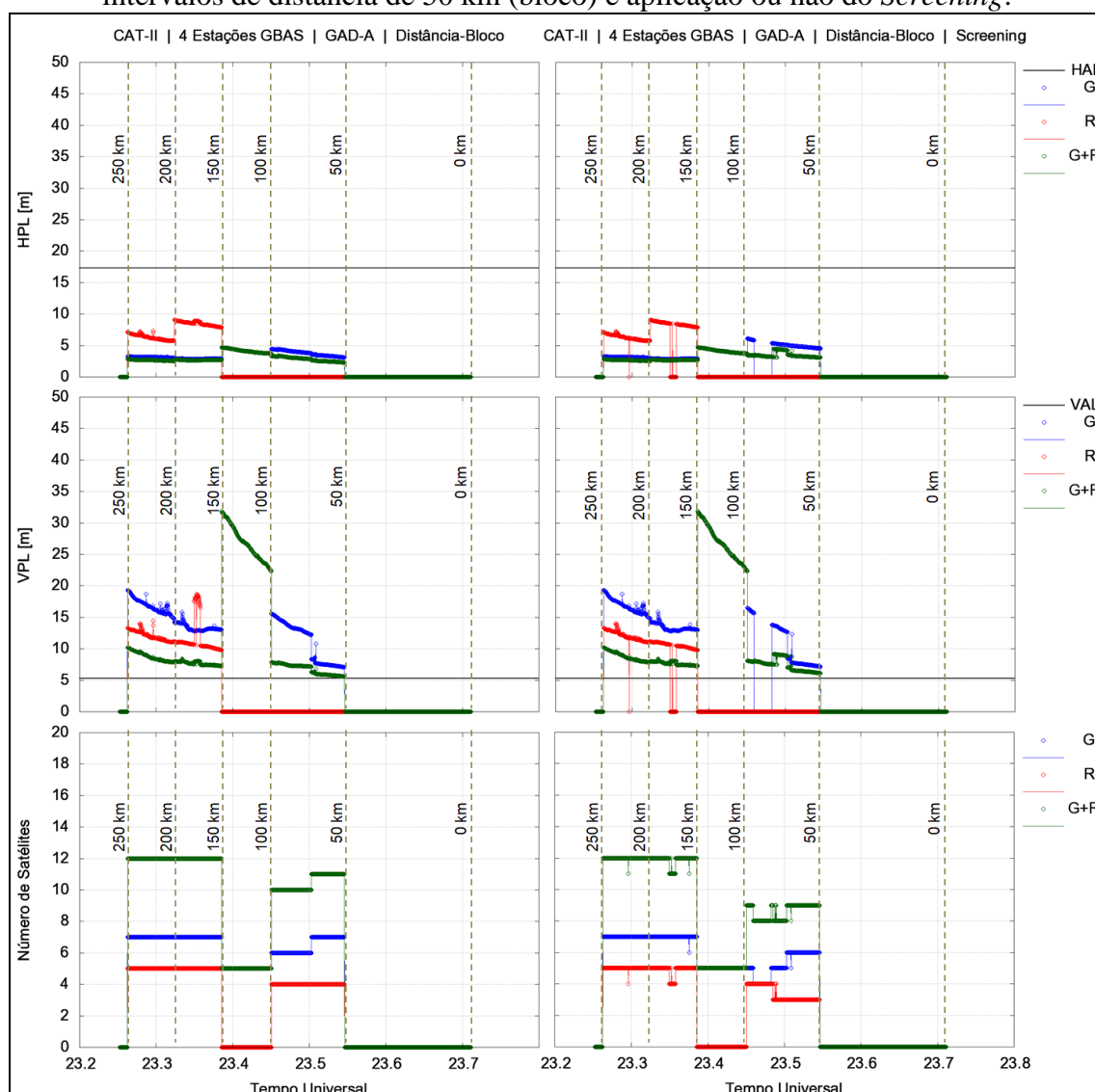


Figura 183 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-II no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} sem distinção de distância (geral) e aplicação ou não do *Screening*.

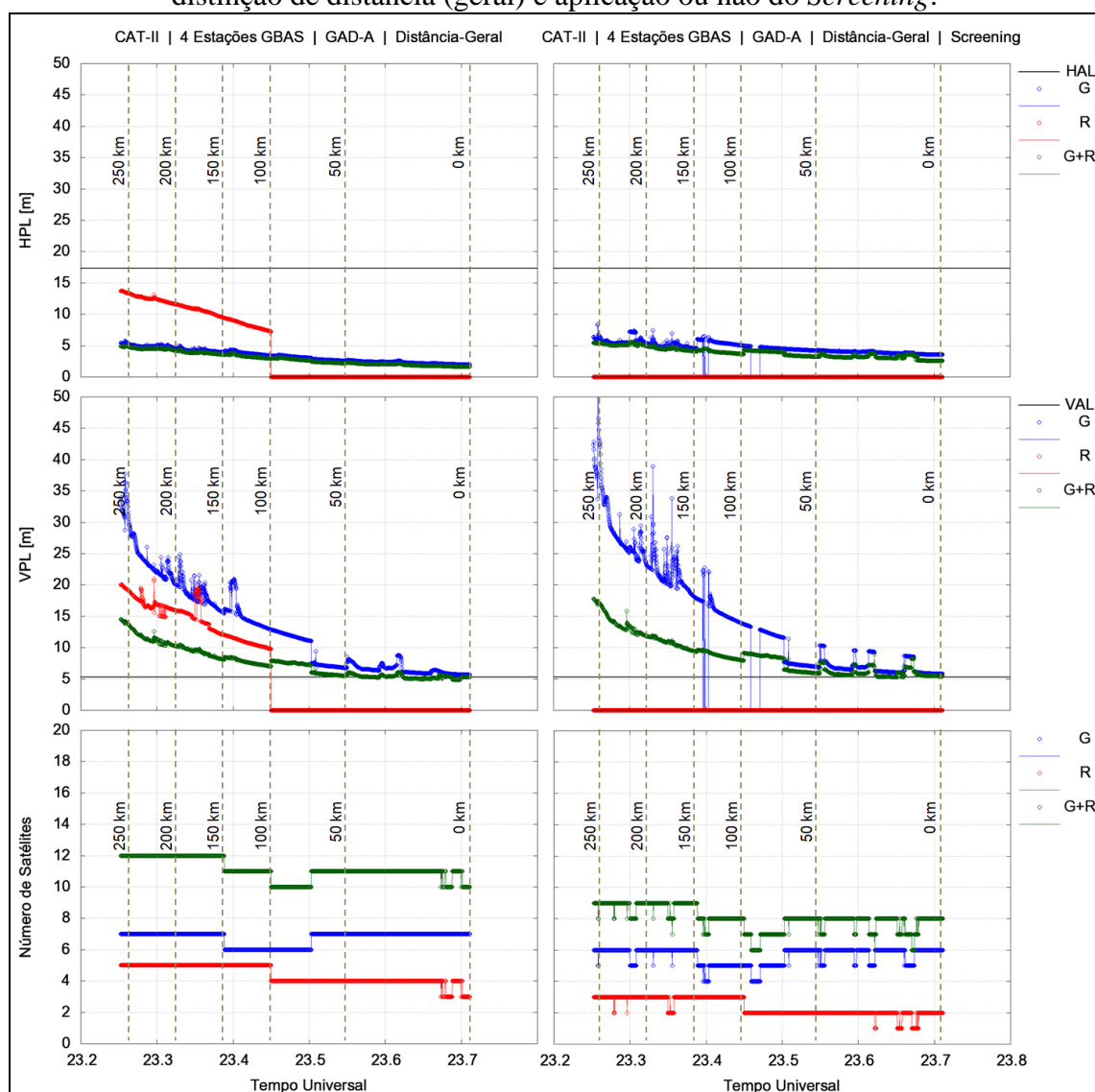


Figura 184 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e aplicação ou não do *Screening*.

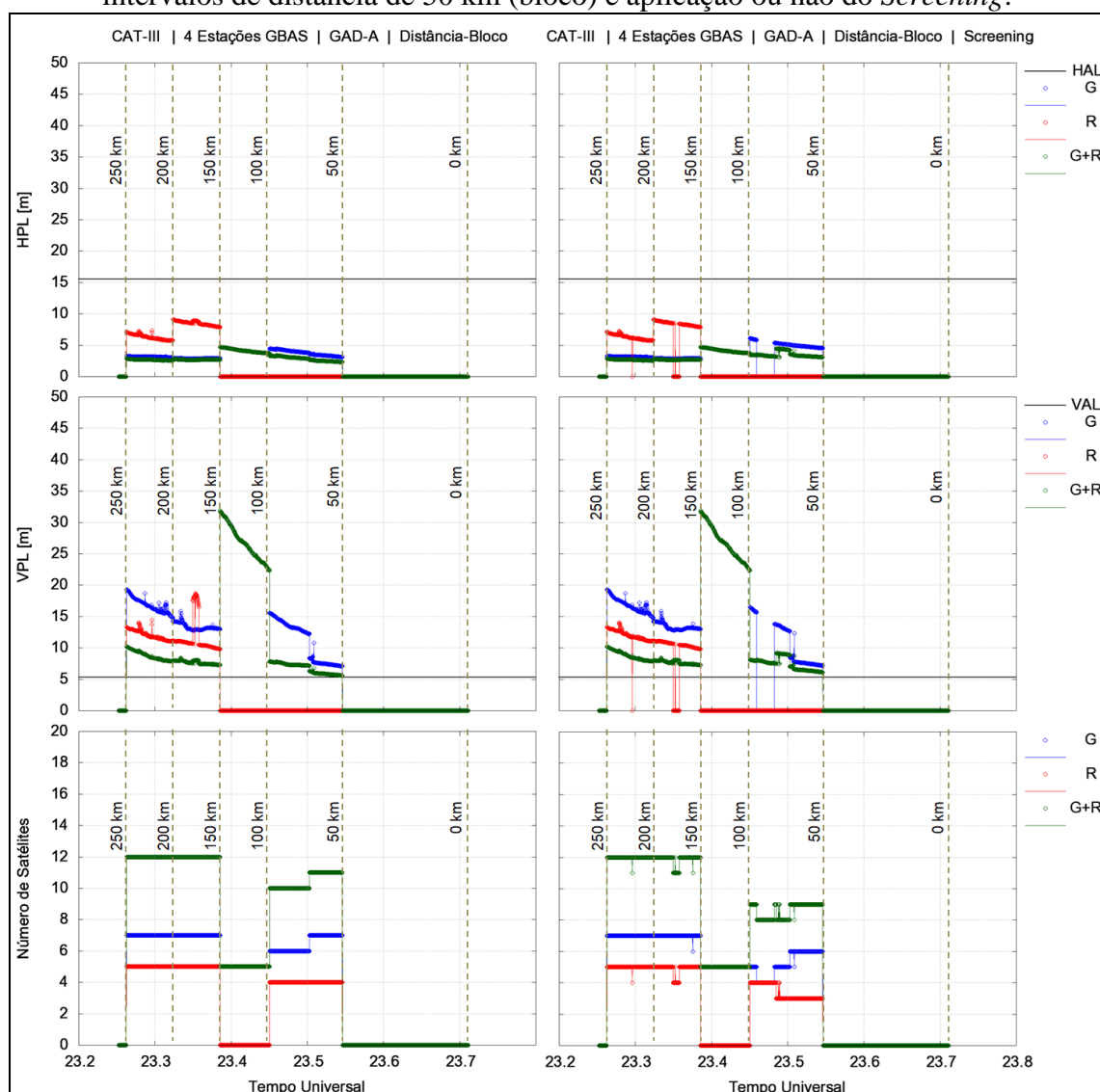


Figura 185 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} sem distinção de distância (geral) e aplicação ou não do *Screening*.

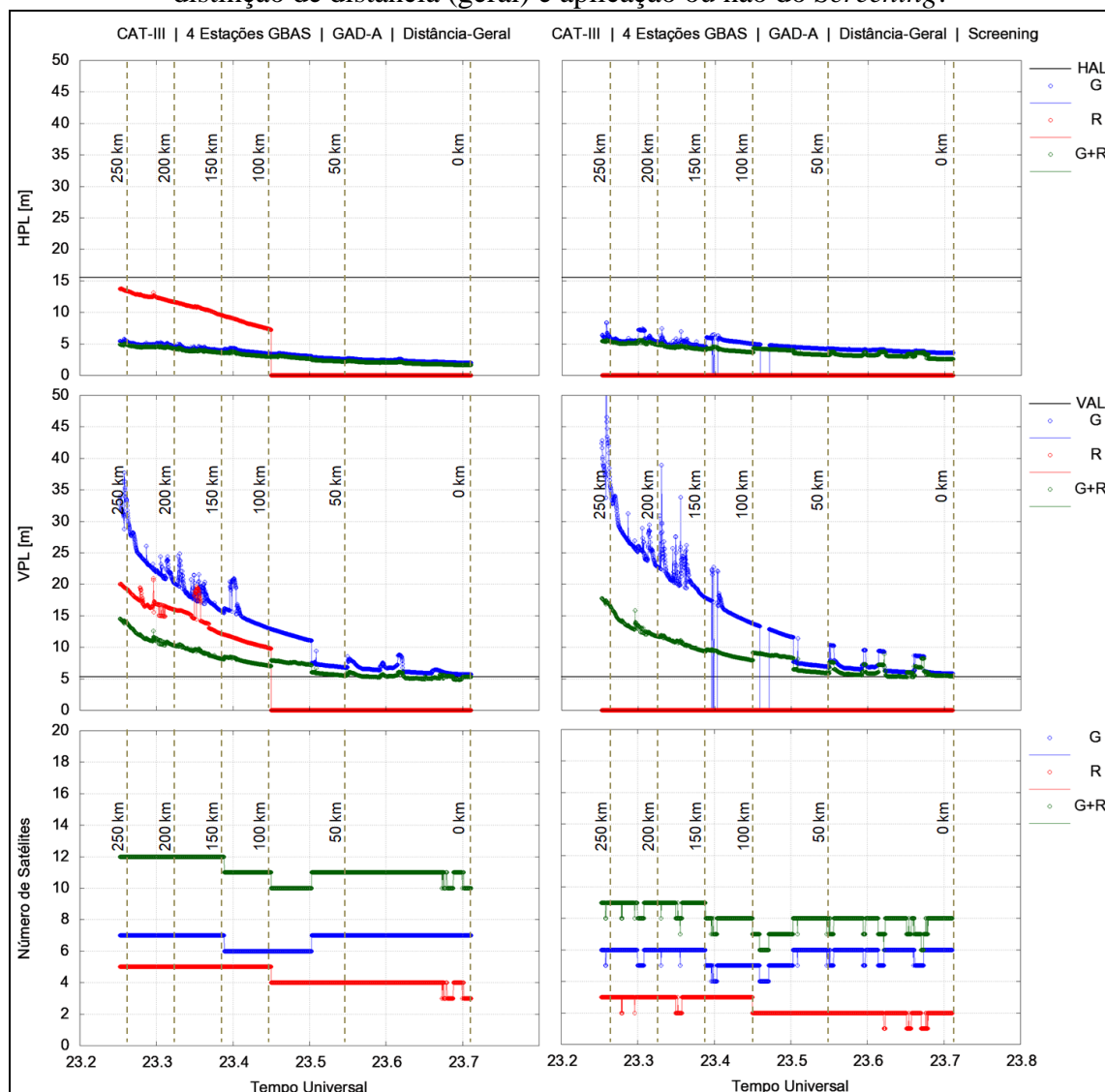
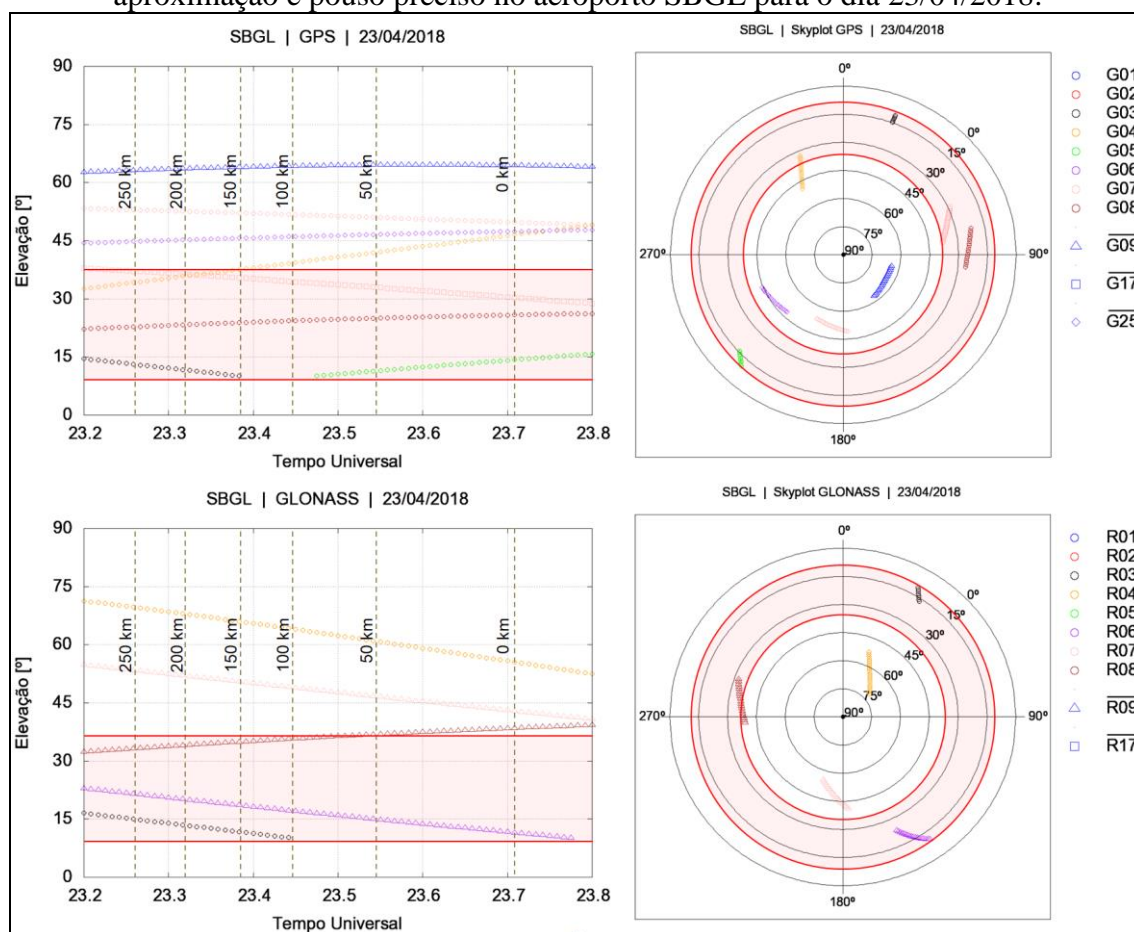


Figura 186 – Elevação e *skyplot* dos satélites GPS e GLONASS disponíveis para a aproximação e pouso preciso no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018.



A partir da Figura 180 verifica-se que os valores de HPL atendem o HAL de 40 m para CAT-I. Em relação ao nível vertical nota-se que, com exceção do bloco 100-150 km e de alguns instantes para os satélites norte-americanos, os demais valores atendem o limiar de 12 m estabelecido pela ICAO.

O não atendimento do VPL durante o bloco 100-150 km está relacionado com número de satélites disponíveis, cinco (mínimo necessário para ter um grau de liberdade), e o não atendimento do nível de proteção vertical dos satélites GPS durante os blocos 150-200 km e 200-250 km se deve a concentração de satélites com elevações entre 10° e 37°, janela de restrição identificada pelo modelo de risco durante o período do outono. A partir da Figura 186, que apresenta a elevação dos satélites GPS e GLONASS disponíveis em função do tempo universal, bem como os respectivos *skyplots*, checa-se que a partir do instante 23h27 TU a maioria dos satélites situam-se fora do intervalo de restrição, acarretando no atendimento dos valores de VPL em relação a VAL.

Fato interessante a destacar é a utilização conjunta dos satélites GPS e GLONASS, que melhoram consideravelmente os valores de proteção. Isso é devido ao aumento de redundância de satélites, ou seja, do grau de liberdade, que tende a sobrepor a degradação dos sinais que poucos satélites podem sofrer pelas frentes ionosféricas.

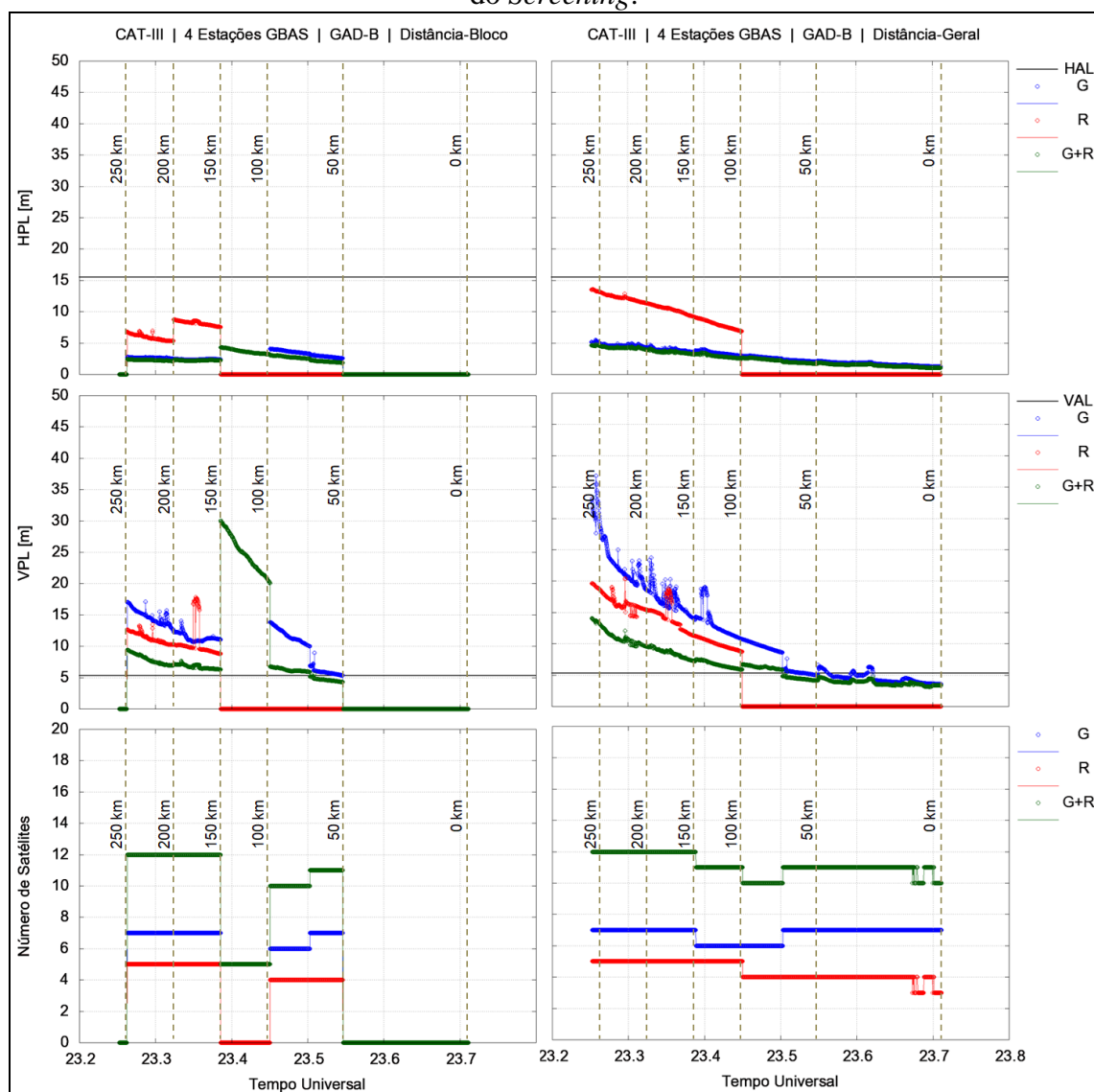
Comparando as Figuras 180 e 181 verifica-se que a estimativa do σ_{vig} em blocos de distâncias de 50 km traduz com mais realidade a variabilidade do comportamento da camada ionosférica, ao contrário de um único valor para região circundante do aeroporto que, por sua vez, implica em comportamento mais moderado dos níveis de proteção. Tal fato é evidente ao observar as distâncias de 150 a 250 km das duas figuras: quando se realiza a estimativa do desvio-padrão do gradiente vertical em blocos, os valores de VPL e HPL são bem menores que os respectivos valores oriundos do σ_{vig} para a distância geral.

A partir da Figura 181 observa-se que a técnica *Screening* deve ser utilizada apenas quando há um número elevado de satélites disponíveis, pois, caso contrário, a exclusão excessiva de satélites superiores ao limiar de 4 mm/km do *CONUS Threat Model* proporciona uma piora da geometria espacial, degradando assim a estimativa dos níveis de proteção, conforme pode ser notado para o caso dos satélites GPS e, principalmente, para o GLONASS, que após a exclusão restaram apenas 2 ou 3 satélites disponíveis, impossibilitando a estimativa de VPL e HPL. Em contrapartida, utilizando as duas constelações em concomitância observa-se que, após o *Screening*, no mínimo seis satélites estão disponíveis, o que reflete na estimativa do VPL em especial, atendendo praticamente o limiar de CAT-I.

Para os casos de CAT-II e CAT-III (Figuras 182 a 185), em ambos os valores de HPL foram inferiores aos 17,3 m e 15,5 m do HAL, respectivamente. Entretanto, em nenhum instante para essas categorias os valores de VPL satisfizeram o limite de 5,3 m de VAL, tanto considerando as distâncias em bloco ou geral quanto aplicando ou não a triagem dos satélites, o que indica a inviabilidade, para esse experimento, de se realizar aproximação e pouso preciso dos tipos CAT-II e CAT-III e considerando GAD-A.

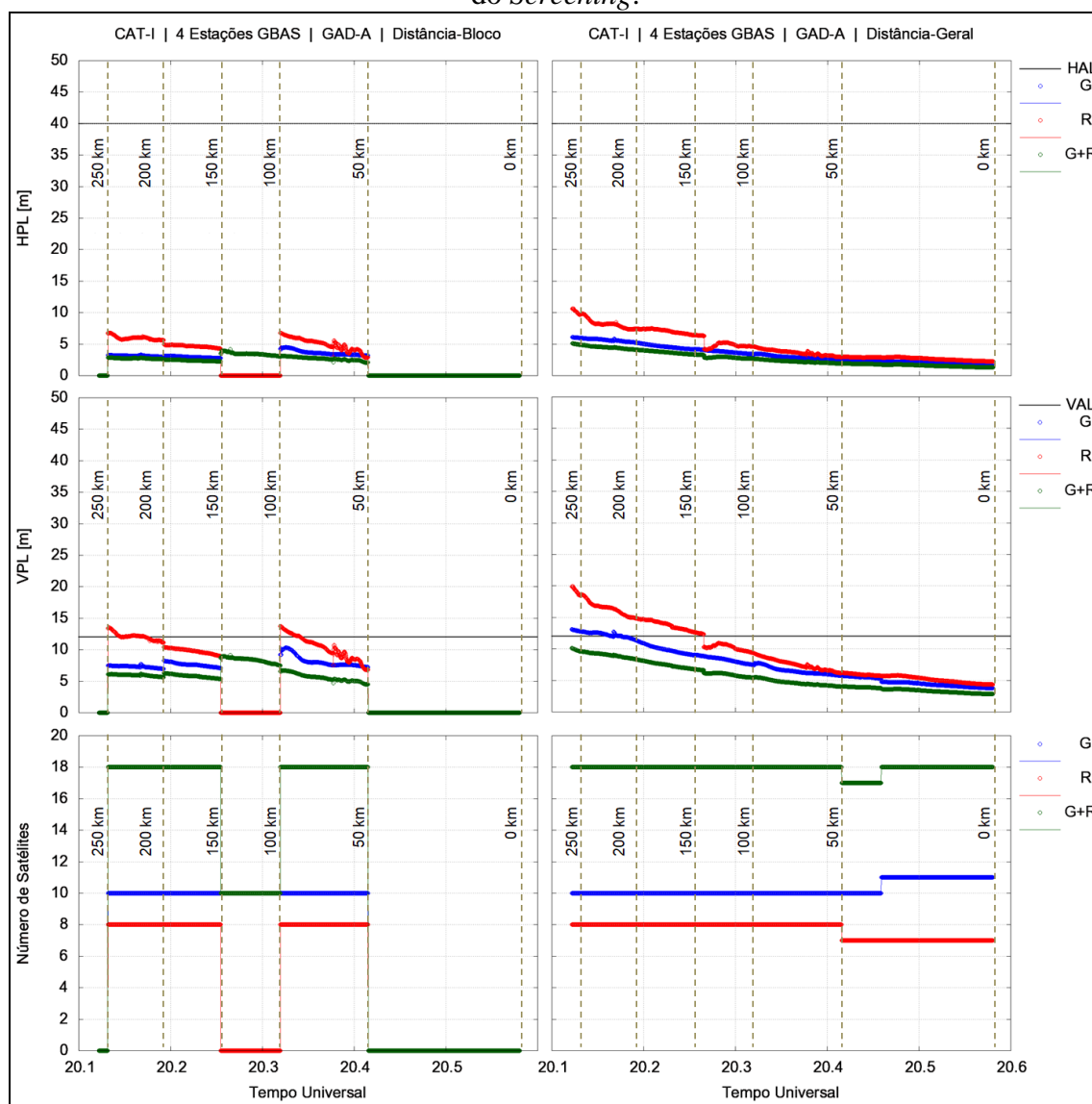
Na situação de se utilizar os parâmetros GAD-B para a aproximação do tipo CAT-III, conforme apresenta a Figura 187, verifica-se que pelo menos nos últimos 75 km de distância os valores de VPL, para a combinação de satélites GPS e GLONASS, satisfazem o valor de VAL (5,3 m), e que nos últimos 50 km o uso somente dos satélites GPS também atende o limiar. Tais resultados indicam que o uso combinado das constelações é uma provável alternativa para se realizar aproximação e pouso preciso CAT-III no aeroporto internacional do Rio de Janeiro.

Figura 187 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-III no aeroporto SBGL para o dia 23/04/2018, considerando GAD-B, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e sem distinção de distância (geral), e sem aplicação do Screening.



A respeito da avaliação para o período do inverno, em que não foram identificados restrições, observa-se pela Figura 188 que durante o período das 20h 07min 18s às 20h 34min 49s TU do dia 10 de maio de 2018 os níveis HPL e VPL, tanto para GPS quanto para a combinação com o GLONASS foram inferiores a HAL e VAL para CAT-I, GAD-A e com 4 estações de referência operantes. Em relação à constelação russa observa-se que para a estimativa do σ_{vig} em blocos os níveis de proteção também atende os limites de alerta; já para a estimativa independente da distância, os valores de VPL somente são inferiores a VAL quando a distância até o GBAS é igual ou inferior a 150 km, distância exata essa em que se inicia a aproximação da aeronave ao aeroporto.

Figura 188 – HPL, VPL e número de satélites disponíveis para a aproximação CAT-I no aeroporto SBGL para o dia 10/05/2018, considerando GAD-A, determinação do σ_{vig} por intervalos de distância de 50 km (bloco) e sem distinção de distância (geral), e sem aplicação do *Screening*.



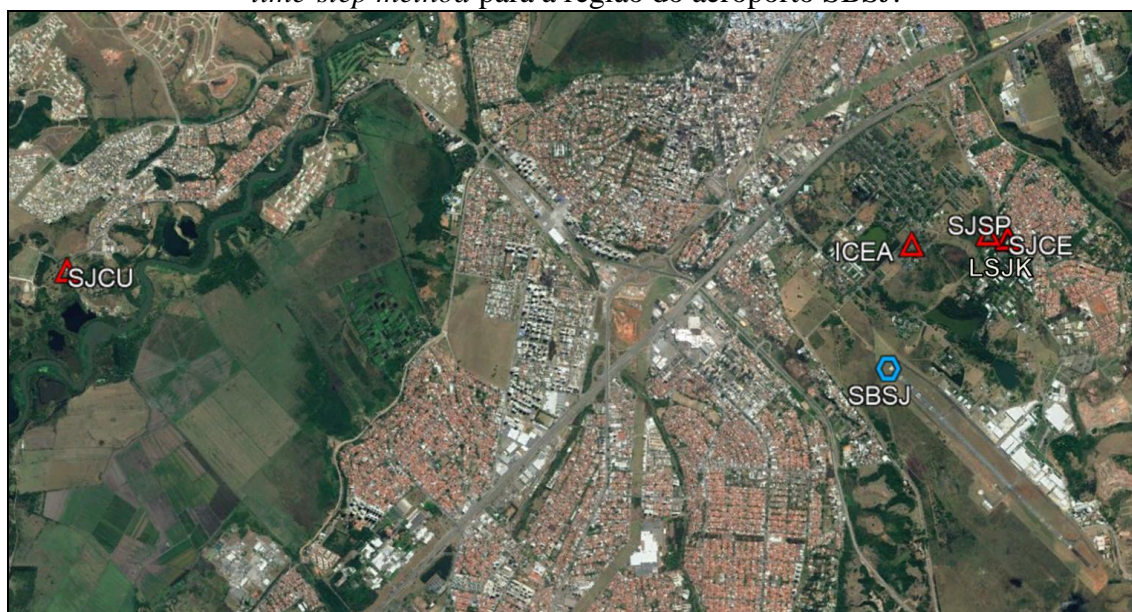
6.7 Estimativa de Gradientes Ionosféricos a Partir do *Time-Step Method* para a Região do Aeroporto SBSJ

Devido à escassez de estações de monitoramento contínuo em determinadas regiões do Brasil, em especial na floresta Amazônica e no Centro-Oeste, associado às dimensões continentais do país, contribui para uma baixa densidade de estações por quilômetro quadrado, ou seja, estações muito distantes uma das outras. Diante desse cenário, a estimativa de gradientes ionosféricos pelo *station-pair method* não é a mais recomendada.

Nesse sentido, um estudo de caso para analisar as vantagens e desvantagens do uso de gradientes estimados a partir do *time-step method* no Brasil foi realizado. Um programa auxiliar, nomeado de MoR_Ion_PP_TSM foi implementado para realização de tal experimento.

A região selecionada para a estimativa dos gradientes é a do aeroporto de São José dos Campos/SP (SBSJ), onde se encontram cinco estações (ICEA, LSJK, SJCE, SJCUC e SJSP) em um raio de 10 km, conforme mostra a Figura 189. Esse cenário de proximidade das estações é necessário para que seja possível realizar uma análise temporal e de amplitude dos gradientes ionosféricos, uma vez que uma determinada condição ionosférica atuante no local é monitorada por várias fontes independentes.

Figura 189 – Localização das estações utilizadas na estimativa de gradientes ionosféricos pelo *time-step method* para a região do aeroporto SBSJ.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

Interessante a destacar é que além de todas as estações rastream sinais GPS nas portadoras L1 e L2, quatro estações também rastreiam satélites GLONASS (ICEA, SJCE, SJCUC e SJSP), três sinais Galileo nas portadoras L1 e L5 (ICEA, SJCE e SJCUC) e também a portadora L5 do GPS (ICEA, SJCE e SJCUC).

Assim, foram estimados gradientes ionosféricos a partir de medidas de fase da portadora pelo método do passo do tempo utilizando a equação (53), sendo as distâncias entre os IPP determinadas em intervalos de 30 segundos. Ressalta-se que os IPP dos satélites foram obtidos considerando uma altura da camada ionosférica de 350 km e uma máscara de

elevação de 10° . Foi selecionado o dia 6 de março de 2016 devido ao conhecimento *a priori* da atuação de fortes irregularidades ionosféricas na região, bem como, para realizar a comparação com os gradientes obtidos para o par SJCE-SJCU pelo *station-pair method*, apresentados na seção 5.1.

As Figuras 190 a 193 apresentam, respectivamente, os gradientes para os satélites GPS (L1/L2 e L1/L5), GLONASS (L1/L2) e Galileo (L1/L5). Já a Figura 194 particulariza a comparação simultânea das estações para os satélites G08, R09 e E22 durante o período das 20h às 24h TU.

Figura 190 – Gradientes ionosféricos para os satélites GPS obtidos a partir das combinações de fase em L1/L2, referentes às estações ICEA, LSJK, SJCE, SJCU e SJSP para o dia 06/03/2016.

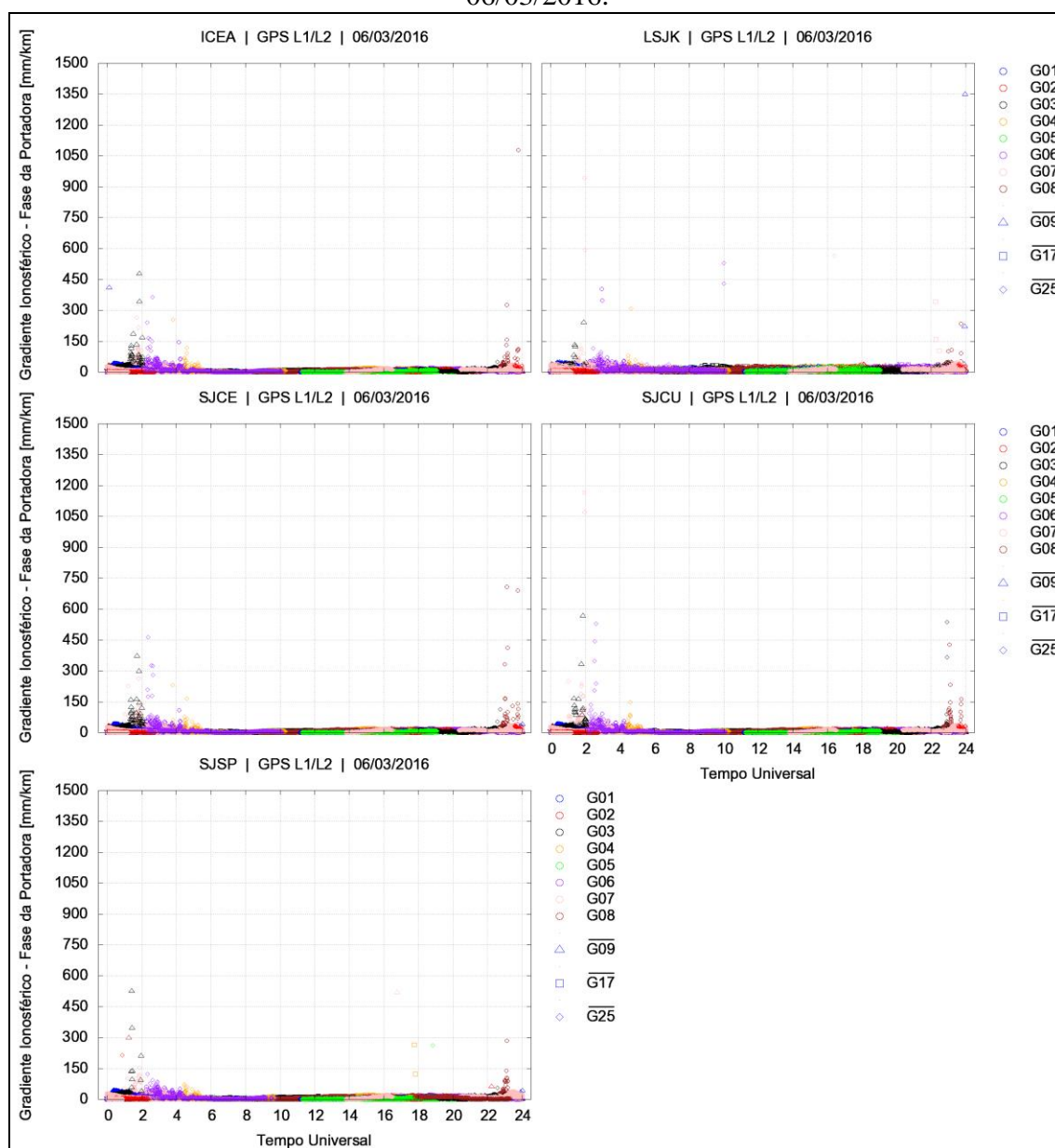


Figura 191 – Gradientes ionosféricos para os satélites GPS obtidos a partir das combinações de fase em L1/L5, referentes às estações ICEA, SJCE e SJCU para o dia 06/03/2016.

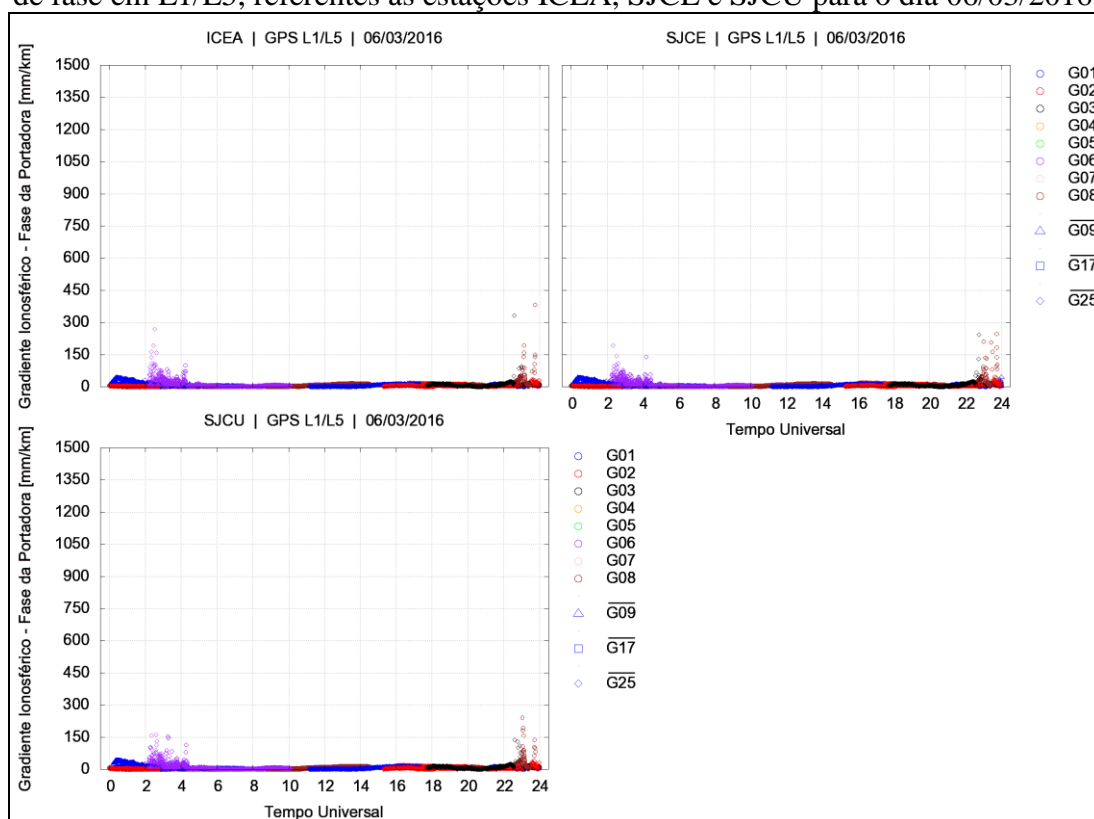


Figura 192 – Gradientes ionosféricos para os satélites GLONASS obtidos a partir das combinações de fase em L1/L2, referentes às estações ICEA, SJCE, SJCU e SJSP para o dia 06/03/2016.

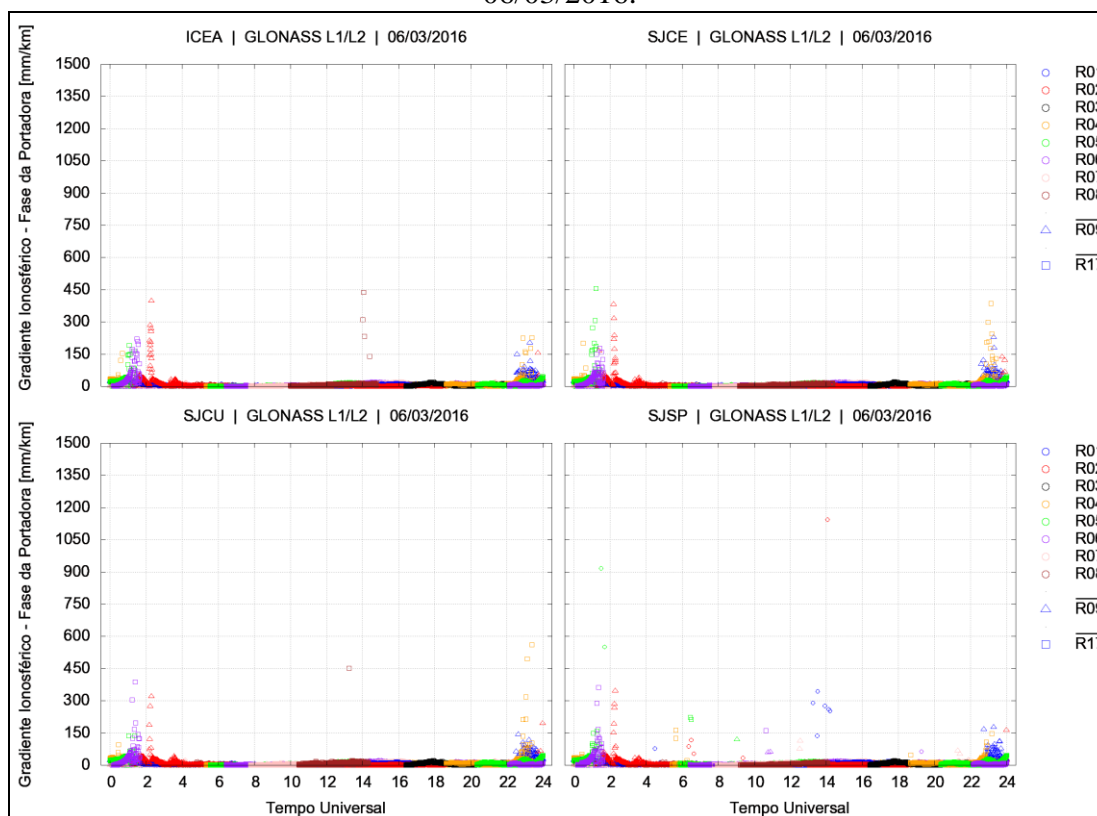


Figura 193 – Gradientes ionosféricos para os satélites Galileo obtidos a partir das combinações de fase em L1/L5, referentes às estações ICEA, SJCE e SJCU para o dia 06/03/2016.

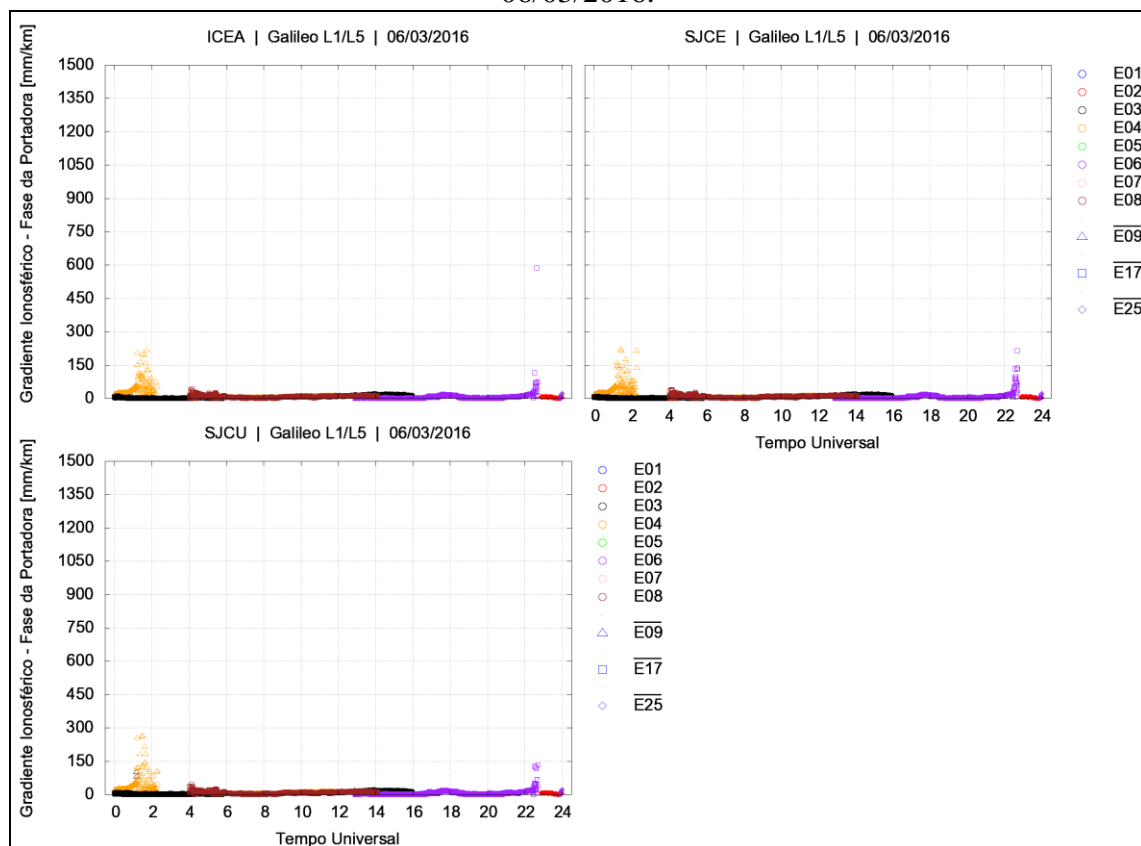
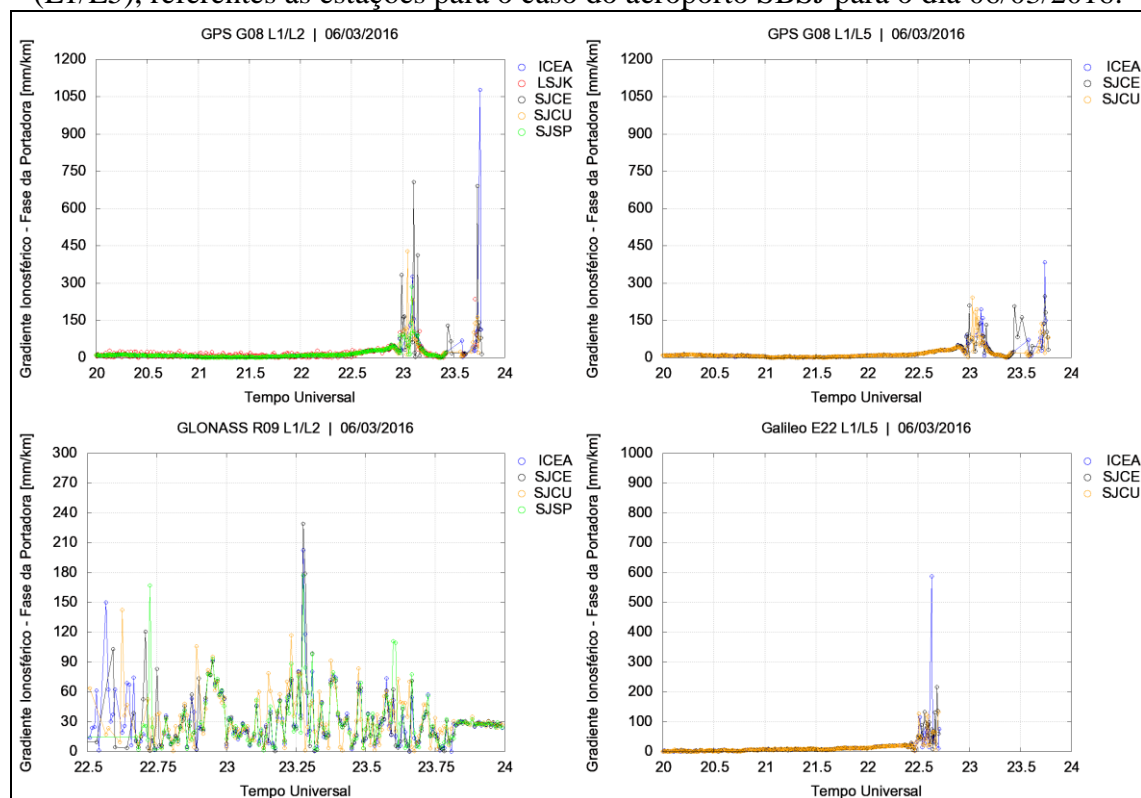


Figura 194 – Gradientes ionosféricos dos satélites G08 (L1/L2 e L1/L5), R09 (L1/L2) e E22 (L1/L5), referentes às estações para o caso do aeroporto SBSJ para o dia 06/03/2016.



Analisando visualmente as Figuras 190 a 193 nota-se, claramente, a real correspondência do comportamento temporal e de amplitude entre os gradientes das estações em estudo, independente da constelação e combinação de portadoras utilizadas. Em todas as estações foi detectada a ocorrência de gradientes acima de 150 mm/km durante os períodos das 22h às 4h TU, o que evidencia a independência na estimativa entre as estações, contribuindo assim para uma futura validação final dos gradientes.

Comparando os gradientes das estações SJCE e SJCU, das Figuras 190 e 191, com os gradientes do par SJCE-SJCU, apresentados na Figura 58, tem-se que há uma semelhança visual significativa entre os oriundos do *time-step method* com os do *station-pair method*, nesse caso tanto para GPS L1/L2 quanto L1/L5. Tal fato possibilita o uso combinado dos métodos no processo de estimativa dos parâmetros do modelo, principalmente em regiões com poucas e esparsas estações, o que não foi realizado na presente pesquisa devido ao grande volume de gradientes que deveriam ser validados manualmente. Ressalta-se também, ao comparar as figuras, que os erros dos receptores presentes nos pares de estações não ocorrem no *time-step method*, o que contribui para a triagem dos gradientes no processo automático.

Especificando a análise temporal e de amplitude para determinados satélites em um curto intervalo de tempo, conforme apresenta a Figura 194, conclui-se mais uma vez que, independente da estação, a mesma frente ionosférica é detectada de forma simultânea e com a mesma intensidade. Observa-se também que, para o satélite GPS G08, os valores dos gradientes a partir da combinação L1/L5 são inferiores aos resultados obtidos para as mesmas estações e instantes quando se utiliza a combinação L1/L2, provavelmente devido ao baixo ruído da L5 em comparação a L2 (CIRCIU et al., 2014). Tal verificação também foi identificada ao comparar os gradientes obtidos pelo *station-pair method* na seção 6.4.

Com relação aos pontos negativos do *time-step method* tem-se: há pouca similaridade com a geometria do par formado por um GBAS e uma aeronave que realiza uma aproximação precisa, sendo assim não muito intuitivo relacionar tal método com as aplicações GBAS; o método acaba introduzindo uma fonte de erro, que se trata da decorrelação temporal, sendo os gradientes obtidos uma mistura de componentes espaciais e temporais; e devido ao aumento da amostragem de gradientes, ocorre um maior dispêndio computacional e, conseqüentemente, uma validação manual mais morosa e refinada.

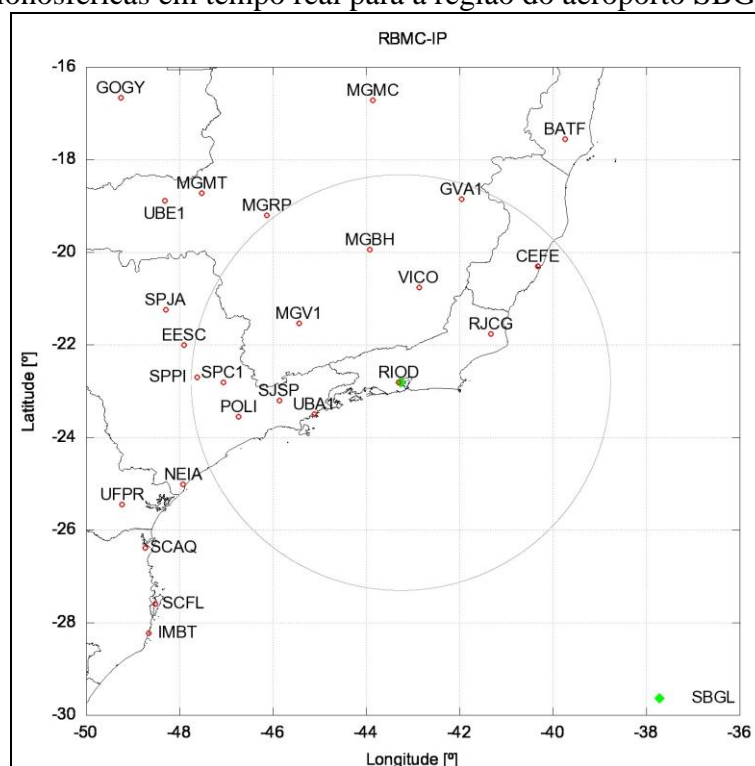
6.8 Monitoramento das Irregularidades Ionosféricas em Tempo Real para a Região do Aeroporto SBGL a Partir dos Sinais GPS e GLONASS

Um método auxiliar que pode ser utilizado pela navegação aérea, no que se trata da segurança ou não de se realizar uma aproximação e pouso preciso, consiste no monitoramento em tempo real das irregularidades ionosféricas e, conseqüentemente, das frentes ionosféricas na região circundante de um determinado aeroporto.

Um monitoramento dessa natureza pode detectar se há no entorno do aeroporto estruturas ionosféricas com elevados gradientes ionosféricos, o que por sua vez impossibilitam realizar uma aproximação precisa para uma determinada operação de voo.

No território brasileiro, usuários e instituições que desejam realizar o monitoramento das irregularidades ionosféricas, bem como, a cintilação dos sinais GNSS em tempo real podem utilizar o programa científico Ion_Index (PEREIRA; CAMARGO, 2016; PEREIRA; CAMARGO, 2017). Para o presente experimento foi elaborado uma versão modificada do programa, permitindo a seleção de 25 estações da RBMC-IP mais próximas do aeroporto do Galeão, conforme apresenta a Figura 195, onde o círculo representa um raio de 500 km em relação ao aeroporto.

Figura 195 – Estações da RBMC-IP utilizadas no monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real para a região do aeroporto SBGL.



Assim, foram obtidos em tempo real os mapas do índice ROTI para o dia 27 de abril de 2018, utilizando os sinais GPS e GLONASS nas portadoras L1 e L2, durante dois períodos: das 13h 21min 15s às 13h 25min 30s TU (Figura 196) e das 23h 02min 00s às 23h 05min 15s TU (Figura 197). Salienta-se que foi adotada uma máscara de 10° , 350 km para a altura da camada ionosférica e que são apresentados os mapas de 15 em 15 segundos.

Figura 196 – Mapas do índice ROTI (13h 21min 15s – 13h 25min 30s TU) capturadas em tempo real referente à região do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 27/04/2018.

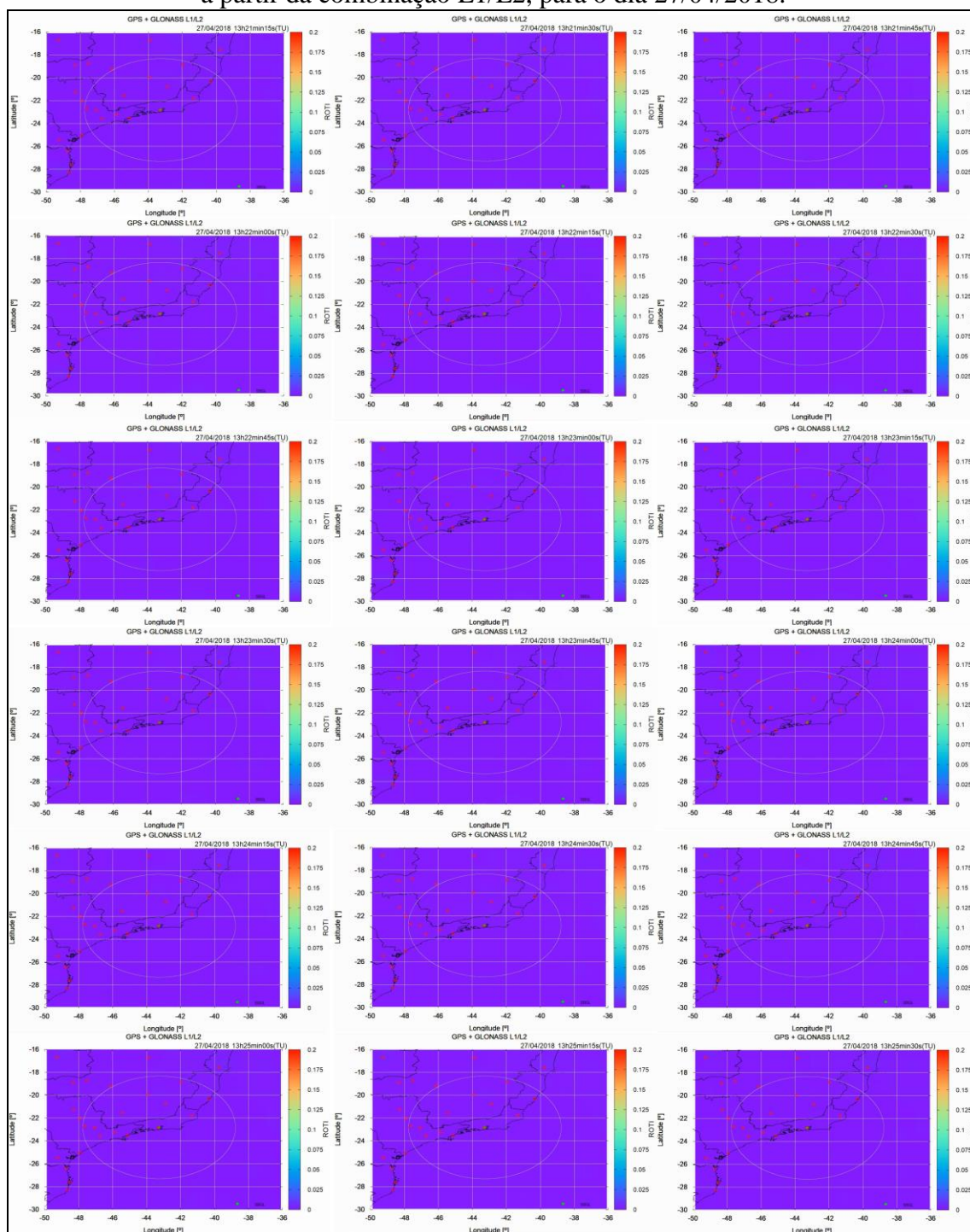
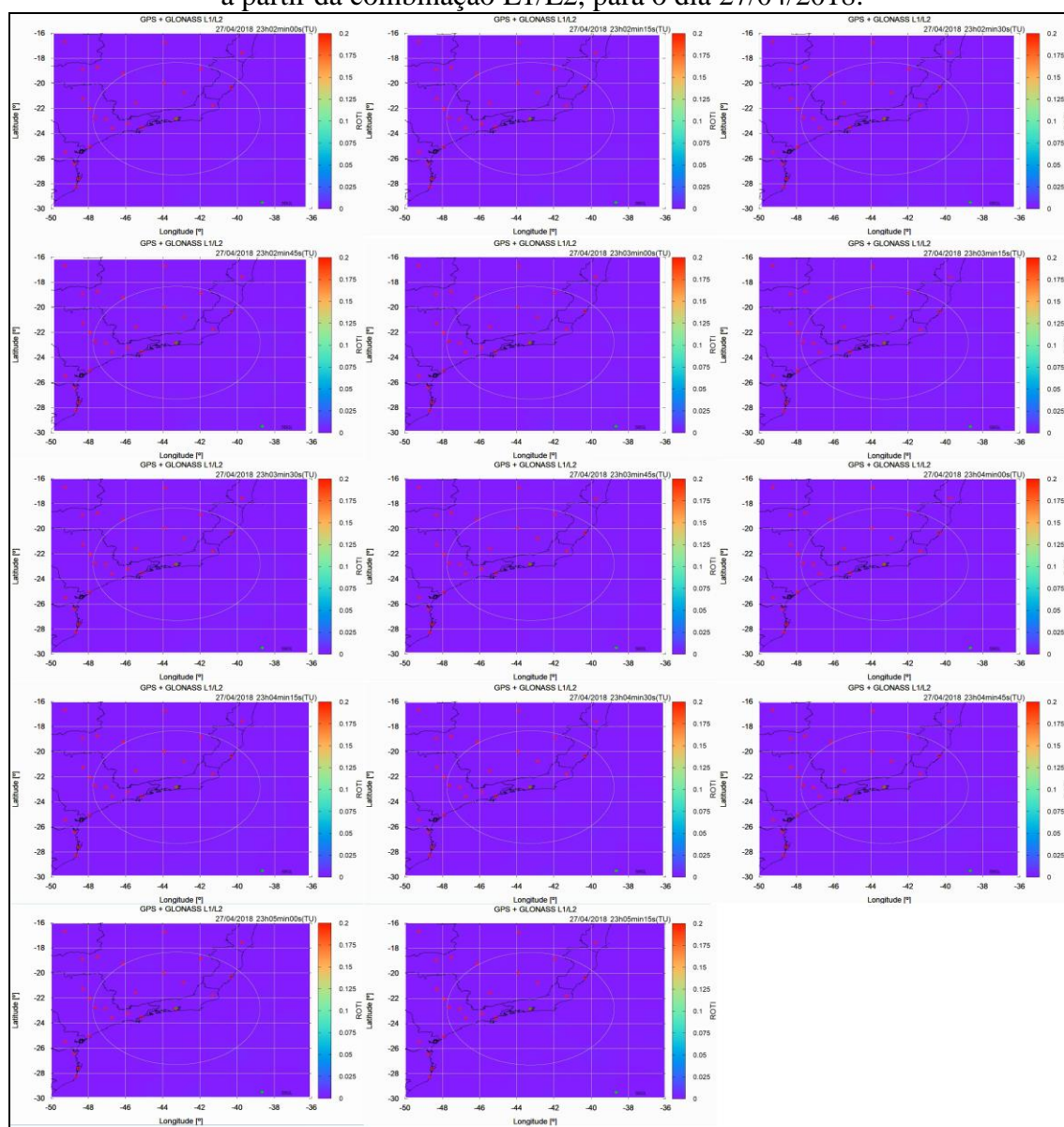


Figura 197 – Mapas do índice ROTI (23h 02min 00s – 23h 05min 15s TU) capturadas em tempo real referente à região do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 27/04/2018.

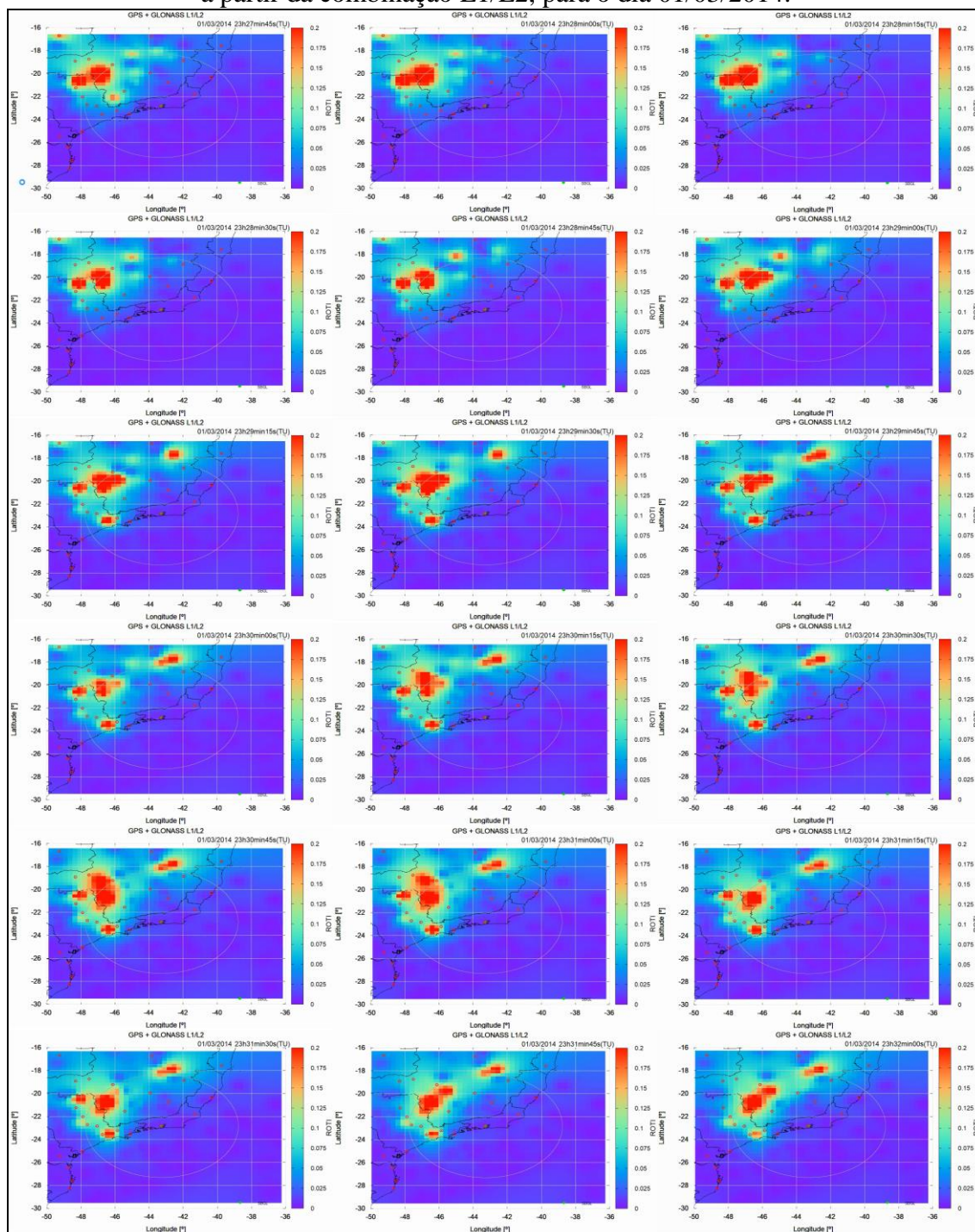


Em decorrência à baixa atividade da camada ionosférica que predomina o declínio do ciclo solar 24, as irregularidades ionosféricas para ambos os períodos foram classificadas como fracas, o que indica que não há frentes ionosféricas atuantes na região do aeroporto, permitindo assim levantar a hipótese da realização do pouso com segurança em um primeiro instante.

Entretanto, para fins de verificação e aplicação do método auxiliar proposto, foram obtidos os mapas do índice ROTI em tempo real utilizando dados GPS e GLONASS (L1/L2) referentes ao dia 1 de março de 2014 (próximo ao pico do ciclo solar 24), procedimento análogo ao realizado no experimento da seção 6.5. A Figura 198 mostra os

mapas do período 23h 27min 45s – 23h 32min 00s TU, também amostrados de 15 em 15 segundos.

Figura 198 – Mapas do índice ROTI (23h 27min 45s – 23h 32min 00s TU) capturadas em tempo real referente à região do aeroporto SBGL, para os satélites GPS e GLONASS obtidos a partir da combinação L1/L2, para o dia 01/03/2014.



Durante o intervalo de tempo do ano de 2014 (Figura 198), os mapas identificaram fortes irregularidades ionosféricas a noroeste do aeroporto, a uma distância de 250 km aproximadamente. Analisando a evolução temporal da frente ionosférica observa-se que a mesma se desloca no sentido de sudoeste a nordeste. Tal comportamento é corroborado pelos mapas de direção e velocidade da frente ionosférica apresentados nas Figuras 103 e 154, para os casos das observáveis GPS e GLONASS (L1/L2), respectivamente. A identificação em tempo real das irregularidades também condiz com os valores dos desvios-padrão dos gradientes ionosféricos verticais apresentados nas Figuras 109 e 155, os quais foram superiores a 20 mm/km para o bloco 0-50 km e maiores que 4 mm/km para o intervalo de 50-100 km.

Assim, diante desse cenário, solução alternativa que poderia ser aplicada com o intuito de realizar a aproximação e pouso preciso seria não utilizar os sinais dos satélites que atravessam tais irregularidades, o que dependeria da trajetória da aeronave e da posição do GBAS.

Independente da utilização ou não do presente método é importante ressaltar que se trata de um método auxiliar que necessita de mais estudos e testes de eficiência.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa realizada proporcionou, além de uma revisão bibliográfica sobre GNSS, ionosfera e modelo de risco ionosférico, 1) um estudo das irregularidades ionosféricas no Brasil durante os ciclos solares 23 e 24, 2) a estimativa dos parâmetros do modelo CONUS de risco ionosférico considerando todo o território do Brasil, a partir das observáveis fase da portadora e pseudodistância filtrada nas portadoras L1 e L2 para os satélites GPS, 3) a estimativa dos parâmetros local-temporais para os aeroportos internacionais brasileiros SBGR, SBGL, SBBR, SBPA e SBRF, identificando a possibilidade de uso do GBAS em tais aeroportos, 4) investigações e análises do emprego da portadora L5 do GPS e dos sinais GLONASS e Galileo no processo de estimativa dos parâmetros do *CONUS Threat Model*, 5) a estimativa do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical em tempo real, para cada um dos aeroportos selecionados, a partir do uso de medidas de pseudodistância filtrada pela fase da portadora, 6) as determinações dos níveis de proteção horizontal (HPL) e vertical (VPL) em tempo real para o procedimento de pouso preciso no aeroporto do Galeão, utilizando dados do GBAS, de aeronave e do σ_{vig} , além da aplicação do *Screening* nos satélites GPS e/ou GLONASS (L1/L2), 7) um estudo de caso referente à estimativa de gradientes ionosféricos a partir do *time-step method* para a região do aeroporto de São José dos Campos/SP, bem como, 8) o monitoramento em tempo real das irregularidades ionosféricas para as proximidades do aeroporto SBGL, a partir do uso dos sinais GPS e GLONASS (L1/L2).

Os quatro primeiros experimentos foram realizados a partir do emprego do sistema desenvolvido no projeto, por meio do programa MoR_Ion no modo pós-processado, o qual faz uso de dados GPS, GLONASS e Galileo das redes ativas RBMC, GNSS-SP, CIGALA/CALIBRA, IGS, LISN e ICEA, referentes aos anos de 2000 a 2016. Já o quinto experimento foi realizado a partir da modalidade em tempo real do programa, o qual utiliza os dados GPS e GLONASS (L1/L2) transmitidos das estações da RBMC-IP via NTRIP. O experimento de número seis combinou os valores de σ_{vig} do MoR_Ion_TR com dados do GBAS do aeroporto do Galeão e com informações de um voo comercial partindo do aeroporto internacional de Recife (SBRF) com destino ao aeroporto carioca. Para o sétimo experimento foi desenvolvido um algoritmo derivado do MoR_Ion_PP, sendo utilizados dados de estações da RBMC, LISN, ICEA e CIGALA/CALIBRA. Por fim, no último experimento empregou-se o programa científico Ion_Index (PEREIRA; CAMARGO, 2016; PEREIRA; CAMARGO, 2017) com algumas modificações.

A respeito das irregularidades ionosféricas pôde-se verificar que as mesmas foram mais fortes e atuantes durante o ciclo solar 23, devido principalmente à intensa atividade solar do período. Valores de F_p superiores a 200, I_{ROT} maiores que 2 e ROTI mais alto do que 0,2 foram determinados durante o período das 22h às 5h TU (19h às 2h local) dos dias 7 de abril de 2000 e 30 de outubro de 2003, datas essas correspondentes aos períodos de outono e primavera do ápice do ciclo 23 e, mesmo durante o inverno do ápice, as irregularidades atingiram valores moderados. Com relação ao ciclo 24 tem-se que as irregularidades ionosféricas apresentaram, de uma forma geral, um comportamento mais moderado.

A intensidade da variabilidade dos valores de atrasos ionosféricos estimados para o período de 2000 a 2016 está muito relacionada com a intensidade das irregularidades da ionosfera. Pôde-se verificar para um satélite GPS do dia 7 de abril de 2000 que um decréscimo acentuado de atraso (de 76 m para 61 m) em um curto intervalo de tempo (5 minutos) foi provocado por fortes irregularidades atuantes na região (I_{ROT} de 4,8 e ROTI de 0,48).

Devido ao baixo número de estações implantadas no Brasil durante o ciclo 23, a correta delimitação das irregularidades para esse período não foi possível de ser feita. No entanto, a identificação pôde ser realizada: ocorrências de irregularidades entre 21h e 4h TU. Já para o período do ciclo 24, onde há uma maior quantidade de estações, foi realizada a identificação, das 22h às 5h TU, bem como a delimitação: deslocamento das gerações das irregularidades ionosféricas de leste para oeste, ao sul e ao norte do equador magnético (coincidindo com o terminador do dia), sobrepondo os estados das regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Uma vez geradas as irregularidades, as bolhas se deslocam no sentido contrário, de oeste para leste, paralelamente ao equador magnético, cobrindo uma área ao sul do equador de, aproximadamente, cinco milhões de quilômetros quadrados.

A estimativa geral dos parâmetros do modelo de risco para o Brasil, utilizando os sinais GPS (L1/L2), indicou que os valores de gradientes ionosféricos superaram, e muito, o limite do *CONUS Threat Model* para qualquer valor de elevação dos satélites, o que sugere a inviabilidade, em um primeiro momento, do uso do GBAS no território nacional. Essa provável inviabilidade foi devido a gradientes obtidos durante o outono, a primavera e o verão, para o período das 22h às 5h TU e para as regiões de latitudes geomagnéticas entre 10° e 20° e entre -40° e -10° , bem como, de longitudes entre -60° e -35° . Em contrapartida, durante o período do inverno, e excluindo os satélites com elevações entre 10° e 30° , os gradientes satisfizeram o limite estabelecido pelo modelo norte-americano. Ao

analisar os valores de σ_{vig} e $\sigma_{\text{vig_infla}}$ para o dia 1 de março de 2014 (20 mm/km e 40 mm/km em média, respectivamente) verificou-se que os mesmos foram bem superiores aos 4 mm/km do *CONUS Threat Model*, o que destaca a completa distinção das condições ionosféricas dos dois países.

Em se tratando das estimativas para os aeroportos selecionados concluiu-se que: para o aeroporto SBGR, há indícios para recomendar o uso das correções diferenciais do GBAS por uma aeronave para a aproximação e pouso preciso, com exceção da janela das 22h às 5h TU referente aos períodos de outono, primavera e verão (não foi verificada restrições para o inverno a partir dos dados processados); para o aeroporto SBGL o GBAS provavelmente pode ser utilizado independente do horário durante o inverno, para a primavera devem-se evitar os horários entre 23h e 24h TU, para o outono não é interessante o uso quando a elevação dos satélites está compreendida aproximadamente entre 10° e 37°, e durante verão exceto para o período de 21h às 24h TU; para o aeroporto internacional de Brasília (SBBR) as estimativas obtidas não indicam nenhuma restrição para o período do inverno, ao passo que deve-se procurar evitar as aproximações e pousos precisos durante os intervalos das 22h às 2h TU dos dias de primavera, das 22h às 3h TU dos dias de verão e das 22h às 4h TU dos dias de outono; a respeito do aeroporto SBPA tem-se que é o único, entre os estudados, que atende os limites do modelo norte-americano, assim, pode-se, provavelmente, utilizar um GBAS no aeroporto sem nenhuma restrição de horário, elevação ou estação do ano; e por fim, para o aeroporto pernambucano (SBRF) tem-se que os gradientes obtidos não atenderam o limite do *CONUS Threat Model* apenas durante o intervalo entre 21h e 24h TU do verão. A Tabela 29 sumariza todas as prováveis restrições ao uso do GBAS nos cinco aeroportos internacionais brasileiros selecionados.

Tabela 29 – Prováveis restrições ao uso do GBAS em alguns aeroportos internacionais brasileiros, considerando os satélites GPS para a combinação L1/L2.

Aeroporto	Estação			
	Outono	Inverno	Primavera	Verão
SBGR	22h-05h TU	-	22h-05h TU	22h-05h TU
SBGL	elevação 10°-37°	-	23h-24h TU	21h-24h TU
SBBR	22h-04h TU	-	22h-02h TU	22h-03h TU
SBPA	-	-	-	-
SBRF	-	-	-	21h-24h TU

Os resultados de estimativas gerais utilizando os sinais GPS e Galileo nas portadoras L1 e L5 apresentaram ser melhores que os das portadoras L1 e L2 em uma análise

inicial. Entretanto, ressalva-se que há necessidade de se utilizar mais pares de estações e um maior conjunto de dias, com o intuito de representar com mais realidade as condições ionosféricas do Brasil. Por fim, em relação ao uso dos sinais GLONASS (L1/L2), foi verificado que há uma semelhança com os resultados do GPS (L1/L2), o que permite, no futuro, o uso da constelação russa pelo GBAS para a transmissão do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical, proporcionando assim uma maior quantidade de satélites para a aplicação da técnica *Screening*.

A estimativa do desvio-padrão do gradiente ionosférico vertical em tempo real para cada satélite visível, a partir do emprego de medidas de pseudodistância filtrada pela fase da portadora, mostrou-se uma técnica válida, uma vez que possibilita a transmissão da real decorrelação ionosférica existente no momento da aproximação e pouso preciso das aeronaves, ao contrário da atual configuração do GBAS que consiste na transmissão de um único valor de σ_{vig} para todos os satélites que, teoricamente, contempla todas as possíveis perturbações ionosféricas. Os resultados obtidos para a data analisada (28 de fevereiro de 2018) mostraram ser condizentes com a condição ionosférica atual, sendo poucos satélites GPS e GLONASS com valores de σ_{vig} superiores a 4 mm/km. Já a estimativa do σ_{vig} para o dia referente ao outono do ápice do ciclo solar 24 (1 de março de 2014), empregando o método em tempo real com algumas adaptações, proporcionou vários satélites com valores superior ao limiar do modelo norte-americano. Assim, a técnica *Screening* para a determinação de VPL e HPL deve ser utilizada desde que haja um número suficiente de satélites.

A avaliação dos parâmetros local-temporais do modelo do CONUS para o aeroporto do Galeão pôde ser realizada para datas referentes às estações de outono e inverno. Pelos resultados obtidos de VPL/HPL verificou-se que há a possibilidade de realizar um procedimento de pouso preciso de categoria CAT-I (VAL de 12 m e HAL de 40 m) com GAD-A e quatro estações GBAS operantes, durante o outono, desde que sejam respeitadas as restrições estabelecidas (evitar satélites com elevações compreendidas aproximadamente entre 10° e 37°), ao passo que no inverno os valores de VPL/HPL foram inferiores a VAL/HAL durante praticamente todo o procedimento (não há restrições estabelecidas para tal período do ano). Pôde-se concluir que a técnica *Screening* deve ser utilizada apenas quando há um número elevado de satélites disponíveis, pois, caso contrário, a exclusão excessiva de satélites superiores ao limiar de 4 mm/km do *CONUS Threat Model* proporciona uma piora da geometria espacial, degradando assim a estimativa dos níveis de proteção. Em contrapartida, constatou-se que o uso combinado de satélites GPS e GLONASS melhoram

consideravelmente os valores de proteção, pois o aumento da redundância de satélites tende a sobrepor a degradação dos sinais que poucos satélites podem sofrer pelas frentes ionosféricas. Fato esse é corroborado pelo experimento que permitiu verificar a viabilidade da realização de um procedimento CAT-III (VAL de 5,3 m e HAL de 15,5 m) com GAD-B e quatro estações operantes, utilizando satélites GPS e GLONASS em concomitância. Foi analisado também que a estimativa do σ_{vig} em blocos de distâncias de 50 km traduz com mais realidade a variabilidade do comportamento da camada ionosférica, ao contrário de um único valor para região circundante do aeroporto que, por sua vez, implica em comportamento mais moderado dos níveis de proteção.

Gradientes ionosféricos obtidos a partir do *time-step method* para o estudo de caso mostraram que o comportamento temporal e de amplitude se repetem nas cinco estações vizinhas, tanto para os satélites GPS (L1/L2 e L1/L5), quanto GLONASS (L1/L2) e Galileo (L1/L5). Tais gradientes também são bem semelhantes com os oriundos do *station-pair method*, possibilitando assim o seu uso no desenvolvimento de modelos de risco, principalmente em regiões com poucas e esparsas estações. Os pontos negativos do *time-step method*, por sua vez, se concentram na pouca similaridade com a geometria do par formado por um GBAS e uma aeronave que se aproxima, na introdução da correlação temporal da ionosfera, e no dispêndio computacional e de validação manual dos gradientes.

O monitoramento em tempo real das irregularidades ionosféricas na região circundante do aeroporto SBGL mostrou ser um método auxiliar para a navegação aérea em relação à realização ou não do pouso preciso. Pelos mapas do índice ROTI para os dois períodos do ano de 2018 verificou-se que as irregularidades foram classificadas como fracas, indicando que não há frentes ionosféricas atuantes na região do aeroporto durante o período, o que pode indicar uma provável realização do pouso com segurança. Em contrapartida, durante o intervalo de tempo de 2014, os mapas identificaram fortes irregularidades, sendo a frente ionosférica se movendo de sudoeste a nordeste. Assim, como solução alternativa para a realização do pouso poderia não utilizar os sinais dos satélites que atravessam tais irregularidades.

Com a experiência adquirida durante o desenvolvimento da pesquisa, a partir das análises dos resultados e das dificuldades de frontadas, e tendo em vista que há muito que se desenvolver em termos computacionais e estudos sobre o tema no setor brasileiro, têm-se as seguintes recomendações para futuros trabalhos:

- Dar continuidade aos estudos das irregularidades ionosféricas no Brasil e na América do Sul durante o declínio do ciclo solar 24 e, por conseguinte, durante a ascensão do próximo ciclo solar 25;
- Com o aumento iminente do número de estações da RBMC por parte do IBGE, realizar o reprocessamento dos parâmetros do modelo CONUS de risco ionosférico para o Brasil, utilizando o *station-pair method*;
- Desenvolver ou avaliar um modelo de risco ionosférico geral, ou para uma específica região ou para um determinado aeroporto utilizando os sinais GPS (L1/L5) e Galileo (L1/L5), oriundos das estações das redes CIGALA/CALIBRA, ICEA e da futura rede INCT GNSS-NavAer;
- Estimar parâmetros local-temporais para outros aeroportos internacionais brasileiros não selecionados na pesquisa;
- Estimar o σ_{vig} em tempo real para outros aeroportos e também utilizando a fase da portadora como medida para determinar os gradientes;
- Estimar e analisar os níveis de proteção VPL e HPL para outras estações do ano, com outras rotas de aeronaves de exemplo e, se possível, para outros aeroportos;
- Estimar parâmetros do modelo de risco utilizando gradientes ionosféricos oriundos do *time-step method*, bem como, integrá-los a estimativas já existentes que foram obtidas a partir do método dos pares de estações;
- Realizar o monitoramento das irregularidades ionosféricas em tempo real para circunvizinhança de aeroportos a partir do emprego de sinais GPS (L1/L5) e Galileo (L1/L5);
- Simular uma estação GBAS a partir da estimativa de correções diferenciais na pseudodistância, com técnicas de filtragem em dados de simples (L1) e de dupla frequência (L1/L2 e L1/L5), tais como: DFree e IFree;
- Avaliar o desempenho de um GBAS de dupla frequência no Brasil, em termos de acurácia, integridade e disponibilidade, utilizando dados nas portadoras L1, L2 e L5 dos satélites GPS, GLONASS e

Galileo. O *station-pair method* pode ser utilizado para a formação dos pares de estações, onde uma das estações representará uma estação GBAS virtual e a outra uma aeronave estática também virtual;

- Implementar uma versão *web* do programa MoR_Ion para facilitar o uso do mesmo;
- Desenvolver um banco de dados contendo todos os resultados gerados pelo programa, de modo a possibilitar uma consulta rápida;
- Requisitar ao IBGE o fornecimento de arquivos RINEX de observações das estações com taxa de amostragem dos dados de 1 Hz ou maior, o que permitiria elevar a resolução temporal dos gradientes ionosféricos, bem como, estimar de forma mais precisa o deslocamento das frentes ionosféricas;
- Adaptar as estações das redes CIGALA/CALIBRA, LISN e ICEA para que transmitam os dados em tempo real via NTRIP; e
- Implementar a ponderação das observáveis dos satélites no modelo estocástico, considerando os efeitos ionosféricos, uma vez que aplicação da técnica *Screening*, que visa à exclusão dos satélites cujos sinais foram degradados, pode levar a falta de redundância no posicionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; BRUM, C. G. M. South Atlantic magnetic anomaly ionization: a review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 67, n. 17-18, 2005. pp. 1643-1657
- ABREU, A. J. *Estudo do papel das ondas planetárias e dos distúrbios ionosféricos na geração de irregularidades ionosféricas equatoriais*. Tese de Doutorado em Física e Astronomia, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2012. 193p.
- AGUIAR, C. R. *Grade ionosférica para aplicação em posicionamento e navegação com GNSS*. Tese de Doutorado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2010. 256p.
- AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Modelagem em tempo real do erro sistemático das observáveis GPS devido à ionosfera. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 12, 2006. pp. 101-120
- AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Resolução espacial da grade ionosférica e do GIVE. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 18, 2012. pp. 464-479
- ALVES, D. B. M. *Posicionamento geodésico utilizando o conceito de estações virtuais*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2008. 166p.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A.; SHIMABUKURO, M. H. First Brazilian real time network DGPS through the internet: development, application and availability analyses. *Journal of Geodetic Science*, vol. 1, 2011. pp. 1-7
- ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. *ANACpédia: conceito de altura de decisão*, 2018. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_ing/tr820.htm>. Acesso em: 6 fev. 2018.
- BARBOSA, E. M.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; OLIVEIRA, L. C. Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 16, 2010. pp. 589-605
- BARBOSA, F. R. E.; FAGUNDES, P. R.; VENKATESH, K.; FEJER, B. G.; PILLAT, V. G.; DENARDINI, C. M.; MUELLA, M. T. A. H. Multi-scale ionospheric irregularities occurrence over South America during the St. Patrick’s day storm on March 17, 2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 174, 2018. pp. 32-45
- BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America. *Annales Geophysicae*, vol. 36, 2018. pp. 91-100
- BATISTA, I. S. *Notas de aula do curso introdução à ionosfera e a propagação de ondas*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2003.

- BÉNIGUEL, Y.; ROMANO, V.; ALFONSI, L.; AQUINO, M.; BOURDILLON, A.; CANNON, P.; DE FRANCESCHI, G.; DUBEY, S.; FORTE, B.; GHERM, V.; JAKOWSKI, N.; MATERASSI, M.; NOACK, T.; POZOGA, M.; ROGERS, N.; SPALLA, P.; STRANGWAYS, H. J.; WARRINGTON, E. M.; WERNIK, A.; WILKEN, V.; ZERNOV, N. Ionospheric scintillation monitoring and modelling. *Annals of Geophysics*, vol. 52, n. 3/4, 2009. pp. 391-416
- BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, vol. 17, n. 3, 1990. pp. 199-202
- BRASSAROTE, G. O. N.; SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. S4 index: Does it only measure ionospheric scintillation? *GPS Solutions*, vol. 22, n. 8, 2018.
- BREMER, J.; CANDER, L. R.; MIELICH, J.; STAMPER, R. Derivation and test of ionospheric activity indices from real-time ionosonde observations in the European region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 68, n. 18, 2006. pp. 2075-2090
- BUMRUNKIT, A.; RUNGRAENGWAJIAKE, S.; SUPNITHI, P.; SIANSAWASDI, N. Drift velocity estimation of ionospheric disturbance using GPS observations. *Proceedings of the 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering*, Chiang Rai, 2014.
- CALDEIRA, M. C. O. *Análise do impacto do efeito ionosférico e cintilação ionosférica no posicionamento baseado em redes e por ponto*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2016. 122p.
- CAMARGO, P. O. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência*. Tese de Doutorado em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. 191p.
- CHAPMAN, S.; BARTELS, J. *Geomagnetism*. Clarendon Press, 1940.
- CHATTERJEE, S.; CHAKRABORTY, S. K. Variability of ionospheric scintillation near the equatorial anomaly crest of the Indian zone. *Annales Geophysicae*, vol. 31, 2013. pp. 697-711
- CHU, F. D.; LEE, C. C.; CHEN, W. S.; LIU, J. Y. A study of long-term climatology of ionospheric irregularities by using GPS phase fluctuations at the Brazilian longitudes. *Advances in Space Research*, vol. 41, 2008. pp. 645-649
- CHUJO, A. M.; WALTER, F. Operações de voo seguras e eficientes usando o conceito GBAS/SBAS. *Anais do 12^o Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA (XII ENCITA)*, São José dos Campos, 2006.
- CIRCIU, M. S.; FELUX, M.; REMI, P.; YI, L.; BELABBAS, B.; PULLEN, S. Evaluation of dual frequency GBAS performance using flight data. *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, Tampa, 2014.
- 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*, vol. 38, n. 1, 2003. pp. 1-23
- DAL POZ, W. R. *Investigações preliminares sobre a influência do clima espacial no posicionamento relativo com GNSS*. Tese de Doutorado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2010. 159p.

- DAL POZ, W. R.; AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G. Posicionamento com o DGPS: análise dos resultados em função da variação espacial e da taxa de atualização das correções. *Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, Curitiba, 2003.
- DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. O. Influência da variação espacial do TEC na definição do comprimento de linha de base: Abordagem teórica e prática. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 60, 2008. pp. 363-374
- DAL POZ, W. R.; CAMARGO, P. O.; AGUIAR, C. R. Período de mínima atividade solar: melhora no desempenho do posicionamento relativo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 14, 2008. pp. 35-54
- DALBELO, L. F. A. *DGPS em rede: desenvolvimento e implantação via internet utilizando a Rede GNSS Ativa do Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2010. 101p.
- DATTA-BARUA, S. Ionosphere threats to Space-Based Augmentation System development. *Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Long Beach, 2004. pp. 1308-1317
- DATTA-BARUA, S. *Ionospheric threats to the integrity of airborne GPS users*. Dissertation PhD in Philosophy, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Palo Alto, 2008. 144p.
- DATTA-BARUA, S.; LEE, J.; PULLEN, S.; LUO, M.; ENE, A.; QIU, D.; ZHANG, G.; ENGE, P. Ionospheric threat parameterization for local area Global-Positioning-System-Based aircraft landing systems. *Journal of Aircraft*, vol. 47, n. 4, 2010. pp. 1141-1151
- DATTA-BARUA, S.; WALTER, T.; PULLEN, S.; LUO, M.; BLANCH, J.; ENGE, P. Using WAAS ionospheric data to estimate LAAS short baseline gradients. *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, San Diego, 2002. pp. 523-530
- DAVIES, K. *Ionospheric radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.
- DE OLIVEIRA, P. S.; MOREL, L.; FUND, F.; LEGROS, R.; MONICO, J. F. G.; DURAND, S.; DURAND, F. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK. *GPS Solutions*, vol. 21, n. 1, 2017. pp. 237-250
- EGNOS. European Geostationary Navigation Overlay Service. *Online*, 2018. Disponível em: <<http://www.esa.int/esaNA/egnos.html>>. Acesso em: 6 fev. 2018.
- EL GIZAWY, M. L. *Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users*. Thesis MSc in Science, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, 2003. 161p.
- ENE, A. *Utilization of modernized Global Navigation Satellite Systems for aircraft-based navigation integrity*. Dissertation PhD in Philosophy, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Palo Alto, 2009. 220p.
- ENE, A.; QIU, D.; LUO, M.; PULLEN, S.; ENGE, P. Comprehensive ionosphere storm data analysis method to support LAAS threat model development. *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, San Diego, 2005. pp. 110-130

- FAA. US Federal Aviation Administration. *Satellite Navigation – Wide Area Augmentation System (WAAS)*, 2018a. Disponível em: <https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/>. Acesso em: 24 out. 2018.
- FAA. US Federal Aviation Administration. *Satellite Navigation – Ground Based Augmentation System (GBAS)*, 2018b. Disponível em: <https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/>. Acesso em: 24 out. 2018.
- FEDRIZZI, M. *Observações do conteúdo eletrônico total com dados do GPS*. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. 142p.
- FEDRIZZI, M. *Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS*. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 223p.
- FIGUEIREDO, C. A. O. B.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; BARROS, D. Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances observed by detrended Total Electron Content maps over Brazil. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 123, n. 3, 2018. pp. 2215-2227
- FONSECA JUNIOR, E. S. *O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil*. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 176p.
- FORTE, B. On the relationship between the geometrical control of scintillation indices and data detrending problems observed at high latitudes. *Annals of Geophysics*, vol. 50, n. 6, 2007. pp. 699-706
- GALILEO. *Galileo Constellation Information*, 2018. Disponível em: <<https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>>. Acesso em: 30 jun. 2018.
- GLONASS. *Russian Federal Space Agency: GLONASS constellation status*, 2018. Disponível em: <<https://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>. Acesso em: 30 jun. 2018.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, H.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 99, n. A4, 1994. pp. 5771-5792
- GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, A. L. C. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, vol. 88, 1999. pp. 529-562
- GPS. Global Positioning System. *Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics*, 2018. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 30 jun. 2018.
- GUIMARÃES, R. C.; SILVA, C. E. *Anomalia Magnética do Atlântico Sul: origem interna e visão espacial*, 2003. Disponível em: <http://www.geocities.com/unibem_palmas/2_AMAS_Origem_Interna_Visao_Espacial.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- GULYAEVA, T. L.; ARIKAN, F.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; STANISLAWSKA, I. GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 102, 2013. pp. 329-340
- GULYAEVA, T. L.; STANISLAWSKA, I. Derivation of a planetary ionospheric storm index. *Annales Geophysicae*, vol. 26, n. 9, 2008. pp. 2645-2648

- HARTMANN, G. A. *A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: causas e efeitos*. Dissertação de Mestrado em Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2005. 153p.
- HATCH, R. The synergism of GPS code and carrier measurements. *Proceedings of the 30th International Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Las Cruces, 1982. pp. 1213-1231
- HEGARTY, C.; EL-ARINI, M. B.; KIM, T.; ERICSON, S. Scintillation modeling for GPS-Wide Area Augmentation System receivers. *Radio Science*, vol. 36, n. 5, 2001. pp. 1221-1231
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. New York: Springer-Verlag Wien, 2008. 516p.
- HWANG, P.; MCGRAW, G.; BADER, D. Enhanced differential GPS carrier-smoothed code processing using dual-frequency measurements. *Navigation*, vol. 46, n. 2, 1999. pp. 127-138
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Relatório de Informação de Estação VICO – Viçosa*, 2012. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/relatorio/Descritivo_VICO.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2018.
- ICAO. International Civil Aviation Organization. *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I, Amendment 88 – Radio Navigation Aids*, 2013a. Disponível em: <<http://aaians.org/sites/default/files/CNS%20Documents/ICAO%20Amedment%2088%20to%20Annex%2010.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2016.
- ICAO. International Civil Aviation Organization. *Global Navigation Satellite System (Gnss) Manual 2nd Edition (Doc 9849)*, 2013b. Disponível em: <http://www.icao.int/airnavigation/Lists/T_Documents/DispForm.aspx?ID=63>. Acesso em: 15 dez. 2016.
- ICAO. International Civil Aviation Organization. *Guide for Ground Based Augmentation System Implementation*, 2013c. Disponível em: <<https://www.icao.int/SAM/eDocuments/GBASGuide.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2018.
- ICAO. International Civil Aviation Organization. *Online*, 2018. Disponível em: <<http://www.icao.int>>. Acesso em: 6 fev. 2018.
- ICEA. Instituto de Controle do Espaço Aéreo. *Relatório técnico sobre a análise de dados ionosféricos e dados de desempenho do sistema GBAS instalado no aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro*. Relatório n° 001/PCCT/2013, dez. 2013.
- IGS. International GNSS Service. *Online*, 2018a. Disponível em: <<http://www.igs.org>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- IGS. International GNSS Service. *Products*, 2018b. Disponível em: <<http://www.igs.org/products>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- INFRAERO. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. *Anuário estatístico operacional 2013*, 2014. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatistica-dos-aeropostos.html>>. Acesso em: 11 set. 2014.
- JAKOWSKI, N.; BORRIES, C.; WILKEN, V. Introducing a new disturbance ionosphere index. *Radio Science*, vol. 47, n. 3, 2012.
- JAN, S. S. Vertical guidance performance analysis of the L1-L5 dual-frequency GPS/WASS user avionics sensor. *Sensors*, vol. 10, 2010. pp. 2609-2625

- JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, J. S. Análise do uso combinado GPS/GLONASS no posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 67, 2015. pp. 201-214
- JIN, X. X. *Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results*. Dissertation PhD, Delft University of Technology, 1996.
- JUNG, S.; LEE, J. Long-term ionospheric anomaly monitoring for Ground Based Augmentation Systems. *Radio Science*, vol. 47, RS4006, 2012.
- KAPLAN, E. D.; HEGART, C. *Understanding GPS principles and applications*. 2nd ed. Norwood, Artech Housed, 2006.
- KIEFT, P.; AQUINO, M.; DODSON, A. Using ordinary kriging for the creation of scintillation maps. *Proceedings of the Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project*, InTech, 2014.
- KIM, J.; LEE, S. W.; LEE, H. K. An annual variation analysis of the ionospheric spatial gradient over a regional area for GNSS applications. *Advances in Space Research*, vol. 54, 2014. pp. 333-341
- KIM, M.; CHOI, Y.; JUN, H. S.; LEE, J. GBAS ionospheric threat model assessment for category I operation in the Korean region. *GPS Solutions*, vol. 19, n. 3, 2015.
- KINTNER, P. M.; LEDVINA, B. M.; DE PAULA, E. R. GPS and ionospheric scintillations. *Space Weather*, vol. 5, n. 9, 2007. pp. 1-23
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Stella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149p.
- KOLB, P. F.; CHEN, X.; VOLLATH, U. A new method to model the ionosphere across local area networks. *Proceedings of the Institute of Navigation*, Alexandria, 2005. pp. 705-711
- KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; MANNUCCI, A. J. A new algorithm for generation high precision ionospheric ground-truth measurements for FAA's Wide Area Augmentation System. *JPL Supertruth Document*, v. 1, 2004.
- KOMJATHY, A.; SPARKS, L.; WILSON, B. D.; MANNUCCI, A. J. Automated daily processing of more than 1000 ground-based GPS receivers for studying intense ionospheric storms. *Radio Science*, vol. 40, RS6006, 2005.
- LEE, J. *GPS-Based aircraft landing systems with enhanced performance: beyond accuracy*. Dissertation PhD in Philosophy, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Palo Alto, 2005. 146p.
- LEE, J.; DATTA-BARUA, S.; ZHANG, G.; PULLEN, S.; ENGE, P. Observations of low-elevation ionospheric anomalies for Ground-Based Augmentation of GNSS. *Radio Science*, vol. 46, RS6005, 2011a.
- LEE, J.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ENGE, P. Assessment of ionosphere spatial decorrelation for Global Positioning System-Based aircraft landing systems. *Journal of Aircraft*, vol. 44, n. 5, 2007. pp. 1662-1669
- LEE, J.; SEO, J.; PARK, Y. S.; PULLEN, S.; ENGE, P. Ionospheric threat mitigation by geometry screening in Ground-Based Augmentation Systems. *Journal of Aircraft*, vol. 48, n. 4, 2011b. pp. 1422-1433
- LEICK, A. *GPS satellite surveying*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

- LI, G.; NING, B.; YUAN, H. Analysis of ionospheric scintillation spectra and TEC in the Chinese low latitude region. *Earth Planets Space*, vol. 59, n. 4, 2007. pp. 279-285
- LIAO, X. *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. Dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 2000. 120p.
- LIN, L. S. A novel approach to improving the accuracy of real-time ionospheric delay estimation using GPS. *Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Kansas City, 1997. pp. 169-178
- LISN. Low-Latitude Ionospheric Sensor Network. *Presentation*, 2018. Disponível em: <<http://lisn.igp.gov.pe/>>. Acesso em: 24 out. 2018.
- LIU, Z. *Ionosphere tomographic modelling and applications using global positioning system GPS measurements*. Dissertation PhD in Science, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, 2004. 304p.
- LUO, M.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ZHANG, G.; WALTER, T.; ENGE, P. LAAS study of slow-moving ionosphere anomalies and their potential impacts. *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Long Beach, 2005. pp. 2337-2349
- LUO, M.; PULLEN, S.; DENNIS, J.; KONNO, H.; XIE, G.; WALTER, T.; ENGE, P.; DATTA-BARUA, S.; DEHEL, T. LAAS ionosphere spatial gradient threat model and impact of LGF and airborne monitoring. *Proceedings of the ION GPS/GNSS*, Portland, 2003. pp. 2255-2274
- MA, G.; MARUYAMA, T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Annals of Geophysics*, vol. 21, n. 10, 2003. pp. 2083-2093
- MANNUCCI, A. J.; WILSON, B. D.; YUAN, D. N.; HO, C. H.; LINDQWISTER, U. J. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*, vol. 33, n. 3, 1998. pp. 565-582
- MARQUES, H. A.; MARQUES, H. A. S.; AQUINO, M.; VEETIL, S. V.; MONICO, J. F. G. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric effects. *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 8, 2018. pp. A15
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. *GPS Solutions*, vol. 15, 2011. pp. 305-314
- MARQUES, H. A. S.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; DE FRANCESCHI, G.; DODSON, A. Stochastic modeling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point positioning. *Advances in Space Research*, vol. 45, 2010. pp. 1113-1121
- MATSUOKA, M. T. *Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: avaliação na região brasileira*. Tese de Doutorado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2007. 263p.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para produção de mapa da ionosfera para região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 56, n. 1, 2004. pp. 14-27

- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de outubro de 2003. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 12, 2006. pp. 315-334
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 27, n. 4, 2009. pp. 565-582
- MATSUOKA, M. T.; COLLISCHONN, C.; KLEIN, I.; CAMARGO, P. O.; PEREIRA, V. A. S. Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 19, n. 1, 2013. pp. 14-33
- MAYER, C.; BELABBAS, B.; JAKOWSKI, N.; MEURER, M.; DUNKEL, W. Ionosphere threat space model assessment for GBAS. *Proceedings of the ION/GNSS*, Savannah, 2009. pp. 1091-1099
- McNAMARA, L. F. *The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.
- MENDILLO, M.; LIN, B.; AARONS, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy. *Radio Science*, vol. 35, n. 3, 2000. pp. 885-904
- MENDONÇA, M. A. M. *Investigando a cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2013. 147p.
- MIELICH, J.; BREMER, J. A modified index for the description of the ionospheric short and long-term activity. *Annales Geophysicae*, vol. 28, n. 12, 2010. pp. 2227-2237
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2ª ed. São Paulo: Ed. da UNESP, 2008. 476p.
- MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 15, n. 3, 2009. pp. 469-483
- MUELLA, M. T. A. H.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; SMORIGO, P. F. Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum – magnetic quiet and disturbed conditions. *Advances in Space Research*, vol. 43, n. 12, 2009. pp. 1957-1973
- MUSHINI, S. C.; JAYACHANDRAN, P. T.; LANGLEY, R. B.; MACDOUGALL, J. W.; POKHOTILOV, D. Improved amplitude and phase scintillation indices derived from wavelet detrended high latitude GPS data. *GPS Solutions*, vol. 16, n. 3, 2012. pp. 363-373
- NIU, F. *Performances of GPS signal observables detrending methods for ionosphere scintillation studies*. Thesis MSc in Science, Department of Electrical and Computer Engineering, Miami University, Oxford, 2012. 58p.
- OLADIPO, O. A.; SCHÜLER, T. Equatorial ionospheric irregularities using GPS TEC derived index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 92, 2013. pp. 78-82
- OLIVEIRA FILHO, K. S. O.; SARAIVA, M. F. O. *Astronomia e astrofísica*. Porto Alegre: Departamento de Astronomia – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 708p.

- PARKINSON, B. W.; ENGE, P. K. Differential GPS. *Proceedings of the Global Positioning System: Theory and Applications*, Cambridge, 1996. pp. 1-50
- PEREIRA, L. M. *O estado da arte do uso do GNSS na aviação civil e os desafios futuros*, 2016. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/14388757-O-estado-da-arte-do-uso-do-gnss-na-aviacao-civil-e-os-desafios-futuros.html>>. Acesso em: 15 dez. 2016.
- PEREIRA, V. A. S. *Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS: em tempo real e pós-processado*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2015. 159p.
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa e análise de índices de irregularidades da ionosfera utilizando dados GNSS de redes ativas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 19, n. 3, 2013. pp. 374-390
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Padrões para classificação dos índices de irregularidades da ionosfera: I_{ROT} e $ROTI$. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife, 2014.
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Programa científico para o monitoramento em tempo real ou pós-processado das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 22, n. 2, 2016. pp. 282-302
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. *GPS Solutions*, vol. 21, n. 3, 2017. pp. 1013-1025
- PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Procedimento geral para o desenvolvimento de modelo de risco ionosférico para GBAS e principais modelos existentes. *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geomática e II Jornadas Lusófonas sobre Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica*, Presidente Prudente, 2017. pp. 563-570
- PEREIRA, V. A. S.; PUGLIESI, E. A.; FLORES, E. F.; CAMARGO, P. O. Krigagem ordinária e visualização de incertezas aplicadas no monitoramento de irregularidades ionosféricas no Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2018. (no prelo)
- PEREIRA, V. A. S.; SOUZA, A. L. C.; CAMARGO, P. O. Redes GNSS ativas como sistema de monitoramento da camada ionosférica. *Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento e XXV Expositiva*, Gramado, 2014.
- PI, X.; MANNUCCI, A. J.; LINDQWISTER, U. J.; HO, C. M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophysical Research Letters*, vol. 24, n. 18, 1997. pp. 2283-2286
- POLEZEL, W. G. C. *Investigações sobre o impacto da modernização do GNSS no posicionamento*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2010. 106p.
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O. Estimativa da tendência diferencial do código nos receptores GNSS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 20, n. 4, 2014. pp. 735-749
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; MUELLA, M. T. A. H. Numerical simulations to assess ART and MART performance for ionospheric tomography of Chapman profiles. *Academia Brasileira de Ciências*, vol. 89, 2017. pp. 1531-1542

- PROL, F. S.; MARCATO JUNIOR, J.; NIEVINSK, F. G.; GOMES, R. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo web TREVel. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 66, n. 3, 2014. pp. 569-579
- PULLEN, S. Worldwide trends in GNSS development and their implications for civil user performance and safety. *Proceedings of the GPS Symposium*, Tokyo, 2007.
- PULLEN, S.; PARK, Y. S.; ENGE, P. Impact and mitigation of ionospheric anomalies on Ground-Based Augmentation of GNSS. *Radio Science*, vol. 44, RS0A21, 2009.
- RODRIGUES, F. S. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS*. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 175p.
- ROWSON, S.; DYKE, K. V.; KLINE, P.; MURPHY, T.; HUA, Q. Evaluation of LAAS Availability with an enhanced GPS constellation. *Proceedings of the Position, Location and Navigation Symposium IEEE*, 1998. pp. 501-509
- SÁNCHEZ-NARANJO, S.; RINCÓN, W.; RAMOS-POLLÁN, R.; GONZÁLEZ, F. A.; SOLEY, S. A comprehensive assessment of ionospheric gradients observed in Ecuador during 2013 and 2014 for ground based augmentation systems. *Advances in Space Research*, vol. 59, n. 8, 2017. pp. 1992-2006
- SANTOS, M. C.; FERREIRA, L. D. D.; LAGO, I. F. Integração entre GPS e GLONASS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, vol. 6, n. 2, 2001. pp. 15-24
- SANTOS, P. M. T. *Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileira*. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. 117p.
- SAPUCCI, L. F. *Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente, 2001. 167p.
- SCHAER, S. *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*. Dissertation PhD, University of Bern, Bern, 1999. 205p.
- SEEBER, G. *Satellite geodesy*. 2nd ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.
- SHAN, S. J.; LIU, J. Y.; KUO, F. S.; LIU, C. C.; TSAI, H. F. GPS phase fluctuations observed along the American sector during low irregularity activity months of 1997-2000. *Earth Planets Space*, vol. 54, n. 2, 2002. pp. 141-152
- SHARMA, S.; DASHORA, N.; GALAV, P.; PANDEY, R. Cycle slip detection, correction and phase leveling of RINEX formatted GPS observables. *Current Science*, vol. 100, n. 2, 2011. pp. 205-212
- SILVA, H. A. *Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS*. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente, 2009. 109p.
- SILVA, H. R.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Análise do desempenho do RTK em rede no Brasil sob efeito da cintilação ionosférica. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 68, 2016. pp. 2083-2102
- SKONE, S. *Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region*. Dissertation PhD in Science, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, 1998. 198p.

- SKONE, S.; LACHAPPELLE, G.; YAO, D.; YU, W.; WATSON, R. Investigation the impact of ionospheric scintillation using a GPS software receiver. *Proceedings of the ION/GNSS 2005 Conference*, Long Beach, 2005. pp. 1-12
- SRINIVAS, V. S.; SARMA, A. D.; REDDY, A. S.; REDDY, D. K. Investigation of the effect of ionospheric gradients on GPS signals in the context of LAAS. *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 57, 2014. pp. 191-205
- STANISAK, M.; MITTER, M.; FEUERLE, T. Ground-Based Augmentation combining Galileo with GPS and GLONASS. *GPS World*, vol. 25, n. 4, 2014. p. 44
- SUZUKI, K.; PULLEN, S.; ENGE, P.; ONO, T. Evaluation of dual-frequency GBAS performance using data from public receiver networks. *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Portland, 2010. pp. 2592-2602
- TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; BARROS, D.; ABDU, M. A.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K. Equatorial plasma bubble seeding by MSTIDs in the ionosphere. *Progress in Earth and Planetary Science*, vol. 5, n. 1, 2018. pp. 1-32
- TANG, H.; WALTER, T.; BLANCH, J.; ENGE, P.; CHAIN, F. C. Flight test data validation of dual-frequency GPS measurement error characteristics. *Proceedings of the ION/GNSS*, Savannah, 2009. pp. 1637-1644
- USTDA. U.S. Trade and Development Agency. *Effects of Low Latitude Ionospheric Activity on Global Navigation Satellite System (GNSS)*. Relatório Final, 2015.
- VAN DIERENDONCK, A. J.; KLOBUCHAR, J.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. *Proceedings of the Institute of Navigation*, Alexandria, 1993. pp. 1324-1333
- VANI, B. C. *Investigações sobre modelagem, mitigação e previsão de cintilação ionosférica na região brasileira*. Tese de Doutorado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2018. 182p.
- VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: the ISMR query tool. *Computers & Geosciences*, vol. 104, 2017. pp. 125-134
- WALTER, T.; ENGE, P.; HANSEN, A. J. A proposed integrity equation for WAAS MOPS. *Proceedings of the Institute of Navigation*, 1997.
- WANG, Z.; MACABIAU, C.; ZHANG, J.; ESCHER, A. C. Prediction and analysis of GBAS integrity monitoring availability at LinZhi Airport. *GPS Solutions*, vol. 18, 2014. pp. 27-40
- WANNINGER, L. Ionospheric monitoring using IGS data. *Proceedings of the 1993 IGS Workshop*, Berne, 1993. pp. 351-360
- WANNINGER, L. Monitoring ionospheric disturbances using IGS network. *Proceedings of the Workshop IGS: Special Topics and New Directions*, Potsdam, 1995. pp. 57-66
- WEBSTER, I. *A regional model for prediction of ionospheric delay for single frequency users of the Global Positioning System*. Thesis MSc in Science, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, 1993.
- YOON, M.; LEE, J. Medium-scale travelling ionospheric disturbances in the Korean Region on 10 November 2004: potential impact on GPS-Based Navigation Systems. *Space Weather*, vol. 12, 2014. pp. 173-186

**APÊNDICE A – Dias Seleccionados para a Avaliação do Modelo CONUS de Risco
Ionosférico no Brasil**

Para a avaliação do modelo CONUS de risco ionosférico no Brasil foram selecionadas 307 datas compreendidas entre os anos de 2000 e 2016, contemplando os ápices dos ciclos solares 23 e 24, bem como, as quatro estações do ano: outono, inverno, primavera e verão. Os critérios para a seleção dos dias, cuja atividade ionosférica provavelmente foi ativa (anômala), foram: valor máximo do índice K_p do dia sendo maior ou próximo de 6,0; ou valor mínimo do índice D_{st} do dia sendo menor ou próximo de -100 nT; ou valor máximo do índice S4 (sem correção dos ruídos do ambiente) do dia sendo maior ou próximo de 1,0.

Ressalta-se que, dentre os 307 dias, foram escolhidos também os dias 20 e 21 de junho (próximo ao solstício de inverno) para cada um dos anos do referido período, com intuito de abranger uma amostra caracterizada por baixa atividade ionosférica (nominal). Os quadros a seguir apresentam os dias e os valores dos índices supracitados.

2000				
Dia	DOY	K_p	D_{st} [nT]	S4
23/01/2000	023	6,3	-97	-
12/02/2000	043	6,7	-133	-
06/04/2000	097	8,3	-287	-
07/04/2000	098	8,7	-288	-
17/05/2000	138	6,0	-92	-
24/05/2000	145	8,0	-147	-
08/06/2000	160	7,0	-90	-
20/06/2000	172	2,3	-6	-
21/06/2000	173	3,3	-6	-
15/07/2000	197	9,0	-289	-
16/07/2000	198	7,7	-301	-
17/07/2000	199	3,0	-114	-
20/07/2000	202	6,0	-93	-
11/08/2000	224	5,7	-106	-
12/08/2000	225	7,7	-235	-
17/09/2000	261	8,3	-201	-
18/09/2000	262	7,7	-193	-
04/10/2000	278	7,3	-143	-
05/10/2000	279	7,7	-182	-
06/10/2000	280	2,7	-104	-
14/10/2000	288	5,7	-107	-
29/10/2000	303	6,0	-127	-
06/11/2000	311	7,0	-159	-
07/11/2000	312	6,7	-152	-
10/11/2000	315	6,3	-96	-
29/11/2000	334	6,7	-119	-

2001				
Dia	DOY	K_p	D_{st} [nT]	S4
19/03/2001	078	6,7	-105	-
20/03/2001	079	7,3	-149	-
28/03/2001	087	6,3	-86	-
31/03/2001	090	8,7	-387	-
01/04/2001	091	5,7	-228	-
02/04/2001	092	4,7	-101	-
11/04/2001	101	8,3	-271	-
12/04/2001	102	7,3	-236	-
18/04/2001	108	7,3	-114	-
22/04/2001	112	6,3	-102	-
20/06/2001	171	3,3	-26	-
21/06/2001	172	3,7	-30	-
17/08/2001	229	7,0	-105	-
26/09/2001	269	5,7	-102	-
01/10/2001	274	6,0	-148	-
02/10/2001	275	6,7	-104	-
03/10/2001	276	7,0	-166	-
04/10/2001	277	4,3	-94	-
21/10/2001	294	7,7	-187	-
22/10/2001	295	7,3	-177	-
23/10/2001	296	5,3	-165	-
28/10/2001	301	6,7	-157	-
01/11/2001	305	5,0	-104	-
06/11/2001	310	8,7	-292	-
07/11/2001	311	5,7	-165	-
24/11/2001	328	8,3	-221	-
25/11/2001	329	2,7	-145	-

2002				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
24/03/2002	083	6,0	-100	-
17/04/2002	107	7,3	-98	-
18/04/2002	108	7,0	-127	-
19/04/2002	109	6,7	-124	-
20/04/2002	110	7,3	-149	-
11/05/2002	131	6,7	-110	-
12/05/2002	132	4,7	-97	-
23/05/2002	143	8,3	-109	-
20/06/2002	171	2,0	-17	-
21/06/2002	172	2,3	-15	-
02/08/2002	214	6,0	-102	-
21/08/2002	233	5,3	-106	-
04/09/2002	247	6,3	-109	-
07/09/2002	250	7,3	-177	-
08/09/2002	251	7,3	-181	-
01/10/2002	274	7,3	-176	-
02/10/2002	275	7,3	-160	-
03/10/2002	276	6,3	-117	-
04/10/2002	277	6,3	-146	-
05/10/2002	278	5,3	-102	-
07/10/2002	280	5,7	-115	-
08/10/2002	281	6,0	-108	-
14/10/2002	287	4,7	-100	-
24/10/2002	297	6,3	-98	-
25/10/2002	298	6,0	-91	-
20/11/2002	324	6,0	-87	-
21/11/2002	325	6,7	-128	-

2003				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
29/05/2003	149	8,3	-144	-
30/05/2003	150	7,3	-135	-
02/06/2003	153	5,3	-91	-
18/06/2003	169	6,7	-141	-
20/06/2003	171	3,0	-32	-
21/06/2003	172	4,7	-50	-
12/07/2003	193	6,7	-105	-
16/07/2003	197	6,0	-90	-
18/08/2003	230	7,3	-148	-
19/08/2003	231	5,7	-116	-
29/10/2003	302	9,0	-350	-
30/10/2003	303	9,0	-383	-
31/10/2003	304	8,3	-307	-
20/11/2003	324	8,7	-422	-
21/11/2003	325	6,7	-309	-

2004				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
22/01/2004	022	7,0	-130	-
11/02/2004	042	6,3	-93	-
03/04/2004	094	6,3	-104	-
04/04/2004	095	6,3	-117	-
20/06/2004	172	1,3	11	-
21/06/2004	173	1,3	8	-
17/07/2004	199	6,0	-76	-
22/07/2004	204	7,0	-85	-
23/07/2004	205	6,0	-99	-
24/07/2004	206	6,0	-39	-
25/07/2004	207	8,0	-136	-
26/07/2004	208	7,3	-94	-
27/07/2004	209	8,7	-170	-
30/08/2004	243	7,0	-129	-
31/08/2004	244	5,3	-90	-
07/11/2004	312	8,0	-117	-
08/11/2004	313	8,7	-374	-
09/11/2004	314	8,7	-214	-
10/11/2004	315	8,7	-263	-
11/11/2004	316	5,0	-106	-

2005				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
08/01/2005	008	7,0	-93	-
18/01/2005	018	7,7	-103	-
21/01/2005	021	8,0	-89	-
22/01/2005	022	6,0	-97	-
08/05/2005	128	8,3	-110	-
15/05/2005	135	8,3	-247	-
16/05/2005	136	6,3	-101	-
30/05/2005	150	7,7	-113	-
12/06/2005	163	7,3	-103	-
13/06/2005	164	6,0	-106	-
20/06/2005	171	1,0	-8	-
21/06/2005	172	1,0	-4	-
23/06/2005	174	7,0	-85	-
10/07/2005	191	6,3	-92	-
24/08/2005	236	8,7	-184	-
25/08/2005	237	5,0	-106	-
31/08/2005	243	7,0	-122	-
11/09/2005	254	7,7	-139	-
12/09/2005	255	7,0	-89	-
13/09/2005	256	6,0	-88	-

2006				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
14/04/2006	104	7,0	-98	-
20/06/2006	171	1,7	-11	-
21/06/2006	172	0,7	-3	-
14/12/2006	348	7,7	-69	-
15/12/2006	349	8,3	-162	-

2007				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
20/06/2007	171	1,3	-6	-
21/06/2007	172	4,0	-28	-

2008				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
20/06/2008	172	3,0	-30	-
21/06/2008	173	1,3	-18	-

2009				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
20/06/2009	171	2,0	0	-
21/06/2009	172	2,7	-3	-

2010				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
20/06/2010	171	1,3	-9	-
21/06/2010	172	2,3	-11	-

2011				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
01/03/2011	060	5,3	-88	1,0
11/03/2011	070	5,7	-83	1,0
28/05/2011	148	6,3	-80	1,2
20/06/2011	171	2,7	-15	1,5
21/06/2011	172	2,7	-7	1,2
05/08/2011	217	7,7	-96	1,6
06/08/2011	218	6,3	-115	1,7
17/09/2011	260	5,3	-72	1,3
26/09/2011	269	6,3	-118	1,6
27/09/2011	270	5,7	-102	1,5
24/10/2011	297	7,0	-79	1,8
25/10/2011	298	7,3	-147	2,0

2012				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
25/01/2012	025	4,3	-73	1,8
07/03/2012	067	6,0	-74	1,7
09/03/2012	069	8,0	-131	1,7
18/04/2012	109	3,3	-18	1,2
19/04/2012	110	2,7	-8	1,3
20/04/2012	111	3,3	-11	1,4
23/04/2012	114	5,7	-95	1,4
24/04/2012	115	6,7	-108	1,2
15/06/2012	167	0,7	9	1,5
16/06/2012	168	6,3	16	1,4
20/06/2012	172	1,3	-20	1,2
21/06/2012	173	0,7	-6	1,2
15/07/2012	197	7,0	-127	1,2
16/07/2012	198	6,3	-102	1,4
17/09/2012	261	2,0	-5	2,1
18/09/2012	262	3,3	-20	1,2
19/09/2012	263	4,7	-39	1,6
01/10/2012	275	6,7	-119	1,9
08/10/2012	282	6,3	-95	1,6
09/10/2012	283	6,7	-105	1,8
13/10/2012	287	5,7	-87	1,7
14/11/2012	319	6,3	-108	2,1

2013				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
17/03/2013	076	6,7	-132	1,6
19/03/2013	078	3,0	-97	1,4
01/06/2013	152	7,0	-119	1,4
07/06/2013	158	5,7	-73	1,6
20/06/2013	171	4,3	-8	1,4
21/06/2013	172	4,0	-17	1,6
28/06/2013	179	4,7	-87	1,4
29/06/2013	180	6,3	-98	1,5
06/07/2013	187	4,7	-79	1,0
14/07/2013	195	5,0	-73	1,5
02/10/2013	275	7,7	-67	2,0
06/11/2013	310	2,0	-11	1,8
07/11/2013	311	4,0	-54	1,8
08/11/2013	312	2,7	-25	2,0
09/11/2013	313	5,0	-81	1,8
10/11/2013	314	3,3	-37	1,8
11/11/2013	315	4,7	-70	2,6
12/11/2013	316	0,7	-26	2,4
13/11/2013	317	1,0	-28	2,1
14/11/2013	318	0,7	-14	1,8
15/11/2013	319	4,0	-31	2,1
16/11/2013	320	3,7	-44	1,8
17/11/2013	321	2,3	-27	2,1
18/11/2013	322	1,0	-18	2,0
19/11/2013	323	2,0	-8	2,1
20/11/2013	324	1,7	-16	2,1
21/11/2013	325	0,7	-8	2,2
22/11/2013	326	1,0	-10	2,1
01/12/2013	335	3,7	-21	1,8
02/12/2013	336	0,3	-10	1,8
03/12/2013	337	2,7	-19	1,6
04/12/2013	338	2,3	-18	1,6
05/12/2013	339	1,7	-19	2,1
16/12/2013	350	2,7	-24	1,8
17/12/2013	351	2,3	-10	2,3
18/12/2013	352	1,3	-11	2,0
19/12/2013	353	2,3	-22	1,7
20/12/2013	354	2,3	-13	1,9
21/12/2013	355	1,7	-11	1,8
22/12/2013	356	0,7	0	1,7
23/12/2013	357	0,7	3	1,9
24/12/2013	358	1,7	2	2,1
25/12/2013	359	3,0	-35	1,6
26/12/2013	360	0,7	-14	2,2
31/12/2013	365	2,0	-9	1,8

2014				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
03/01/2014	003	3,0	-30	1,8
04/01/2014	004	2,3	-19	2,0
05/01/2014	005	1,3	-16	1,7
06/01/2014	006	1,3	-15	1,9
07/01/2014	007	3,3	-14	1,9
08/01/2014	008	3,3	-17	1,9
09/01/2014	009	3,0	-25	1,9
10/01/2014	010	2,0	-11	1,7
11/01/2014	011	2,3	-13	1,8
14/01/2014	014	3,3	-19	2,2
15/01/2014	015	1,7	-20	1,8
16/01/2014	016	1,0	-12	1,8
17/01/2014	017	1,7	-9	2,1
18/01/2014	018	1,0	-12	1,6
19/01/2014	019	0,3	-4	1,8
20/01/2014	020	0,7	-5	1,8
21/01/2014	021	2,7	-13	2,0
22/01/2014	022	3,3	-20	1,9
23/01/2014	023	2,3	-18	1,9
24/01/2014	024	3,0	-17	2,3
25/01/2014	025	3,0	-23	1,9
26/01/2014	026	2,7	-29	1,7
27/01/2014	027	1,7	-16	2,4
28/01/2014	028	2,3	-14	1,8
29/01/2014	029	2,0	-17	2,0
30/01/2014	030	2,3	-18	2,0
31/01/2014	031	0,7	-11	2,0
01/02/2014	032	2,7	-4	1,8
02/02/2014	033	2,0	-3	2,4
03/02/2014	034	2,3	-10	2,0
04/02/2014	035	1,7	-9	2,1
05/02/2014	036	2,0	1	2,0
06/02/2014	037	3,0	-29	1,8
11/02/2014	042	2,7	-20	2,0
12/02/2014	043	3,0	-18	2,2
13/02/2014	044	0,7	0	1,8
14/02/2014	045	1,7	3	2,9
15/02/2014	046	4,3	-6	2,7
19/02/2014	050	6,3	-116	2,2
20/02/2014	051	6,0	-91	2,1
24/02/2014	055	2,0	-48	2,3
25/02/2014	056	2,0	-16	2,2
26/02/2014	057	1,7	-9	2,1
27/02/2014	058	5,3	-94	2,1
28/02/2014	059	4,0	-90	1,6
01/03/2014	060	2,7	-50	2,3

02/03/2014	061	3,3	-27	2,4
03/03/2014	062	2,3	-24	2,1
04/03/2014	063	2,3	-14	2,0
05/03/2014	064	2,0	-9	1,9
06/03/2014	065	2,7	-13	1,7
07/03/2014	066	1,0	-6	2,1
08/03/2014	067	0,7	-8	2,0
27/03/2014	086	2,0	-22	2,4
28/03/2014	087	3,0	-13	2,0
12/04/2014	102	4,7	-81	1,8
20/06/2014	171	3,0	-14	1,1
21/06/2014	172	2,0	-23	1,2

2015				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
07/01/2015	007	6,3	-99	1,8
17/03/2015	076	7,7	-223	1,7
18/03/2015	077	6,0	-190	1,4
20/06/2015	171	0,3	-14	1,9
21/06/2015	172	3,7	-3	1,6
22/06/2015	173	8,3	-121	1,5
23/06/2015	174	7,7	-204	1,5
24/06/2015	175	4,0	-91	1,6
27/08/2015	239	6,3	-91	1,6
28/08/2015	240	5,7	-88	1,6
09/09/2015	252	6,0	-98	1,4
07/10/2015	280	7,3	-124	1,6
08/10/2015	281	5,7	-90	1,5
07/11/2015	311	6,0	-96	1,6
20/12/2015	354	6,7	-170	1,6
21/12/2015	355	6,7	-160	1,4
31/12/2015	365	5,7	-109	1,5

2016				
Dia	DOY	K _p	D _{st} [nT]	S4
01/01/2016	001	6,0	-117	2,2
20/01/2016	020	4,7	-104	2,1
06/03/2016	066	6,3	-96	1,8
20/06/2016	172	1,3	-4	1,9
21/06/2016	173	1,0	-4	1,3

Fontes dos Índices:

K_p e D_{st}: <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>>.

S4: <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/>>.