

Bruno César Vani

*Investigações sobre Modelagem, Mitigação e
Predição de Cintilação Ionosférica na Região
Brasileira*

TESE

Presidente Prudente

2018

Bruno César Vani

Investigações sobre Modelagem, Mitigação e Predição de Cintilação Ionosférica na Região Brasileira

Tese de Doutorado desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus Presidente Prudente.

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquisa Filho
Faculdade de Ciência e Tecnologia – FCT/UNESP – Câmpus Presidente Prudente
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico
Coorientador: Prof. Dr. Milton Hirokazu Shimabukuro

Presidente Prudente/SP

Março de 2018

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

V33i Vani, Bruno César.
Investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica na região brasileira / Bruno César Vani. - 2018
182 f. : il.

Orientador: João Francisco Galera Monico
Coorientador: Milton Hirokazu Shimabukuro
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2018
Inclui bibliografia

1. Cintilação ionosférica. 2. GNSS. 3. Mitigação. 4. Predição. I. Monico, João Francisco Galera. II., Shimabukuro, Milton Hirokazu. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

Claudia Adriana Spindola
CRB-8ª/5790

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

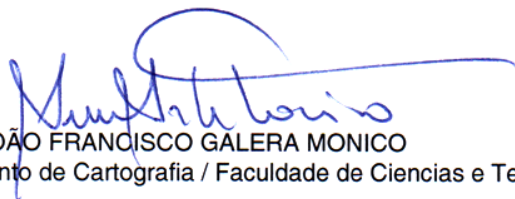
TÍTULO: INVESTIGAÇÕES SOBRE MODELAGEM, MITIGAÇÃO E PREDIÇÃO DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NA REGIÃO BRASILEIRA

AUTOR: BRUNO CÉSAR VANI

ORIENTADOR: JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

COORIENTADOR: MILTON HIROKAZU SHIMABUKURO

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. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Dr. EURICO RODRIGUES DE PAULA

Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas, Divisão de Aeronomia / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



Dr. ALISON DE OLIVEIRA MORAES

Centro Técnico Aeroespacial / Instituto de Aeronáutica e Espaço



Prof. Dr. FELIPE GEREMIA NIEVINSKI

Departamento de Geodésia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 01 de março de 2018.

DADOS CURRICULARES

Bruno César Vani

Nascimento: 14/08/1987 em Regente Feijó/SP.

Filiação: Jorge Henrique Vani e Lucimar Santana Vani

2006-2011: Curso de Graduação
Bacharelado em Ciência da Computação
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2012-2014: Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2014-2018: Curso de Pós-Graduação
Doutorado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

*Dedico este trabalho à minha querida
sobrinha Isabella (in memoriam), que em sua
curta passagem no nosso mundo deixou um legado
de perseverança e força de vontade.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde e força de vontade para superar as adversidades da minha jornada. Agradeço à minha noiva Natalia, pelo apoio, paciência e compreensão. Aos meus pais e irmãos, por todo o apoio recebido. Agradeço também aos demais familiares e amigos pelo apoio e compreensão.

Ao Prof. Dr. João Francisco Galera Monico pela orientação neste trabalho, amizade e oportunidades que me proporcionaram um grande crescimento profissional. Ao Prof. Dr. Milton Hirokazu Shimabukuro, coorientador neste projeto de doutorado e mentor em vários outros projetos desde à época da graduação. Ao Prof. Dr. Biagio Forte (University of Bath - UK) – coorientador no exterior durante o período do doutorado sanduíche – pela receptividade no exterior, pelas inúmeras discussões e contribuições para a realização deste trabalho. Agradeço também ao técnico do laboratório de geodésia espacial Me. Italo Tshuchya e ao analista de T.I. Rogério Oyama por todo o apoio operacional para a realização deste projeto. O agradecimento se estende a todos os funcionários da FCT/UNESP.

Aos demais professores da FCT/UNESP que contribuíram com a minha formação na graduação e pós-graduação. Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Ronaldo Celso Messias Correia – por ter despertado meu interesse em assuntos relacionados às Ciências Cartográficas e novamente ao Prof. Milton por ter me apresentado ao Grupo de Estudos em Geodésia Espacial! Aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pela amizade e parceria nos últimos anos, e aos meus companheiros de trabalho do IFSP, que não mediram esforços para me apoiar quando precisei.

Aos professores Dr. Danillo Pereira (UNOESTE) e Dr. Alison Moraes (IAE/ITA) pelas contribuições e sugestões propostas no exame geral de qualificação – realizado em 2016 – e também em outras oportunidades nos anos seguintes. E aos pesquisadores do INPE (São José dos Campos/SP), Dr. Eurico Rodrigues de Paula, Dr. Jonas Rodrigues de Souza e Dr. Stephan Stephany pela receptividade nas visitas que realizei ao INPE nos últimos anos. Agradeço também aos demais pesquisadores de várias partes do mundo com quem tive a oportunidade de interagir durante as pesquisas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e pela concessão de bolsa para a realização do doutorado sanduíche no exterior (CAPES/Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) 19-2016/Processo 88881.134266/2016-01), e também ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) pelo apoio à realização deste projeto através da concessão de afastamento para qualificação.

Resumo

Cintilações Ionosféricas são rápidas variações na amplitude e/ou fase de um sinal de rádio ao se propagar por irregularidades na densidade de elétrons na ionosfera. Este fenômeno degrada a performance do posicionamento pelo GNSS, uma vez que pode acarretar, dentre outros aspectos, a degradação na acurácia de observáveis e em perdas de sincronismo no receptor. No Brasil, verifica-se a maior suscetibilidade de ocorrência de cintilação algumas horas após o pôr-do-sol, nas épocas do ano compreendidas entre os equinócios de primavera e outono nos anos de alta atividade solar. Redes GNSS de monitoramento de cintilações estão implantadas no território brasileiro, incluindo a rede CIGALA/CALIBRA – a qual é mantida pela FCT/UNESP com o apoio de parceiros nos últimos sete anos. Os dados de monitoramento permitem a realização de diversas pesquisas sobre características e efeitos da cintilação, incluindo as investigações conduzidas neste projeto. Foram investigados aspectos sobre a modelagem da cintilação ionosférica no Brasil, com ênfase na mitigação dos seus efeitos no PPP e na predição de ocorrência de cintilação. No contexto da mitigação, abordagens existentes foram avaliadas e uma nova proposta foi desenvolvida. A abordagem proposta para mitigação consiste em um novo modelo funcional, novo modelo estocástico e uma estratégia para minimizar os efeitos de perdas de sincronismo. A abordagem proposta foi testada com o suporte do software científico RT-PPP e os resultados obtidos foram promissores, incluindo casos de recuperação da acurácia esperada do PPP, mesmo sob influência de cintilação forte. No contexto da predição, uma integração de bases de dados de monitoramento oriundos de três redes (CIGALA/CALIBRA, ICEA e LISN) permitiu o desenvolvimento de um modelo preditivo (guiado por dados) baseado em redes neurais artificiais. A rede neural é treinada para obter uma estimativa das localidades e horários onde a cintilação é esperada em uma determinada noite, com base em dados de monitoramento obtidos em noites anteriores. Dados de monitoramento de diferentes regiões coletados no começo da mesma noite (logo após o pôr-do-sol) também são utilizados com o objetivo de inferir padrões acerca do surgimento das irregularidades que causam as cintilações e sua relação com o nível de cintilação observado no restante da noite. O modelo permite obter mapas de cintilação preditos com antecedência de uma a quatro horas, os quais são acompanhados de estimativas de qualidade das predições. Em resumo, este projeto apresenta contribuições com potencial para trazer benefícios ao cenário científico-tecnológico nacional. Além disso, os dados de monitoramento da base de dados integrada foram disponibilizados pela internet à comunidade através do software científico ISMR Query Tool, proporcionando suporte à realização de pesquisas adicionais em diversas instituições do Brasil e do mundo.

Palavras-chave: Cintilação Ionosférica; GNSS; Mitigação; Predição; PPP.

Abstract

Ionospheric scintillations are rapid variation in amplitude and/or phase of a radio signal as it propagates through irregularities on electron density in the ionosphere. Such phenomenon degrades the performance of GNSS positioning, because it may cause accuracy degradation on observables and losses of lock, among other aspects. In Brazil, there is more susceptibility to occurrence of scintillations after sunset time between the spring and autumn equinoxes of years with high solar activity. Monitoring networks based on GNSS receivers are deployed over the Brazilian territory such as the CIGALA/CALIBRA network, managed by FCT/UNESP (with support from partners) in the last seven years. Monitoring data allows to develop several research regarding the scintillation effects, as in this thesis. Aspects regarding the modeling of ionospheric scintillation effects in Brazil were investigated, with emphasis on the mitigation of these effects on PPP and predictions of scintillation occurrence. In the field of mitigation, existing approaches were investigated and a new one was proposed. The new approach for mitigation relies in both new functional and stochastic models for PPP, as well as a strategy to model effects of losses of lock. The proposed approach was tested with the scientific software RT-PPP and the achieved results were promising, including cases in which the expected accuracy for the PPP was recovered. In the field of the predictions, a database integration was conducted with data from three different networks (CIGALA/CALIBRA, ICEA e LISN). The integration allowed the development of a data-driven predictive model based on artificial neural network. The neural network is trained with data from previous nights. Data from the same night (around the sunset time) is also used to detect patterns regarding the emerging of the irregularities driving scintillation occurrence on the whole night. The model allows to generate maps of predicted scintillation with antecedence from one to four hours. In summary, this thesis shows contributions with potential to create benefits on the scientific and technological scenarios in Brazil. Furthermore, monitoring data from the integrated database was made available to the scientific community via the software ISMR Query Tool, providing support to conduct new research in different institutions from Brazil and the world.

Palavras-chave: Ionospheric Scintillation; GNSS; Mitigation; Prediction; PPP.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação gráfica para o modelo de camada simples da ionosfera. Baseado em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001) e Seeber (2003).	31
Figura 2 – Representação gráfica da dinâmica da ionosfera na região equatorial: em cinza claro são representadas as linhas de campo magnético da Terra em diferentes altitudes (100, 300, 600 e 900 km); as linhas pontilhadas em preto representam as direções da evolução das irregularidades no plasma ionosférico após o pôr-do-sol, caracterizando o efeito fonte. Fonte: adaptado de Rich et al. (2004).	35
Figura 3 – Distribuição das estações da Rede CIGALA/CALIBRA.	37
Figura 4 – Representação gráfica dos componentes do sinal em uma época t representados sobre um plano cartesiano.	39
Figura 5 – Intensidade I (normalizada pela média) de um sinal sob efeito de cintilação observada no período de um minuto (amostrada a 50 Hz). Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.	41
Figura 6 – Dados de fase de um sinal sob efeito de cintilação observada no período de um minuto: (a) fase original; (b) tripla-diferença da fase em relação ao tempo; (c) fase filtrada pelo Butterworth de 6ª ordem. Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.	43
Figura 7 – Intensidade de um sinal sob efeito de cintilação observada simultaneamente em diferentes bandas. Dados da estação SJCUI para o satélite GPS 24, observados no dia 11/11/2014 entre 19:50 e 19:51 (LT).	45
Figura 8 – PSD da fase filtrada do sinal em um período de 1 minuto para estimativa dos parâmetros espectrais p e T . Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.	46
Figura 9 – Progressão dos ciclos solares a partir do ano 2000: (a) número de manchas solares; (b) Fluxo solar (F10.7). Fonte: (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) - SPACE WEATHER PREDICTION CENTER, 2018).	49
Figura 10 – Valores médios mensais do F10.7 observados no período entre fevereiro de 1947 a março de 2018. Dados obtidos na base de dados de Clima Espacial do NRCAN (NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN) - SPACE WEATHER, 2018).	49

Figura 11 – Porcentagem de ocorrência de cintilação e índice F10.7: (a) Porcentagem de casos de $S4 > 0.5$; (b) porcentagem de ocorrência de casos de $S4 > 0.2$; (c) Valor médio do F10.7. Fonte: Adaptada de Muella et al. (2017).	50
Figura 12 – Médias diárias do índice S4 para estação PRU2 no período de 2012 a 2016 (dados GPS com máscara de elevação de 10°). As células em cinza indicam indisponibilidade de dados.	51
Figura 13 – Picos de alto índice S4 observados na estação PRU2 ao longo de uma semana.	52
Figura 14 – Desvio-padrão do índice S4. Dados GPS, GLONASS e Galileo coletados por estações de monitoramento da Rede CIGALA/CALIBRA (máscara de elevação de 20°) no período de 22/09/2014 a 15/10/2014.	53
Figura 15 – Comportamento inesperado do índice S4 (inibição de cintilação no dia 21/12/2015) associado à variação no índice Dst: (a) Índice Dst no período de 15 a 24 de Dezembro/2015. Fonte: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (2015); (b) Índice S4 observado na estação FRTZ (Fortaleza/CE) no mesmo período (máscara de elevação de 20°).	55
Figura 16 – Diferentes valores de inclinação (linhas em tons de vermelho) e declinação (linhas em tons de azul) obtidos pelo IGRF abrangendo a região brasileira para a época 2015.	56
Figura 17 – Caracterização do ângulo γ na região do IPP: (a) configuração satélite-receptor; (b) detalhamento do azimuth geográfico (em azul), azimuth magnético (em vermelho), ângulo γ e declinação magnética δ (NM e NG referem-se, respectivamente, ao Norte Geográfico e Norte Magnético).	57
Figura 18 – Caracterização do ângulo β entre o ângulo de elevação do satélite e a inclinação magnética ($\hat{I}$) na região do IPP; NM e NG referem-se, respectivamente ao Norte Magnético e Norte Geográfico.	58
Figura 19 – Histograma de distribuição dos ângulos (a) γ e (b) β em função de valores de índice S4. Dados da estação PRU2 coletados em Novembro/2014.	59
Figura 20 – Histograma de distribuição dos ângulos (a) γ e (b) β em função de valores de índice S4. Dados da estação SJCU coletados em Novembro/2014.	60
Figura 21 – Caracterização de lacunas nas observáveis: (a) observável de fase $\phi_{L1(C/A)}$ obtida no arquivo RINEX (1s); (b) respectivos índices S4 e Sigma-phi; (c) respectiva fase filtrada (a 50 Hz) e indicativos de lacunas nas observáveis; (d) respectiva intensidade normalizada (a 50 Hz) e indicativos de lacunas nas observáveis. Dados coletados na estação SJCU (PRN 24) na noite de 06 de Novembro de 2014.	64

Figura 22 – Intensidade do sinal normalizada em três minutos distintos, os quais apresentam valores de S_4 similares ($S_4 \approx 0,66$), mas diferentes valores para o par $\alpha\text{-}\mu$. Dados da estação SJCUColetados no dia 14/02/2015 (PRN 23).	69
Figura 23 – Diferentes indicadores descrevendo a severidade da cintilação afetando o rastreamento de um satélite ao longo do tempo. Dados coletados na estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014.	72
Figura 24 – (a) Tripla-diferença da pseudodistância $PD_{L1(C/A)}$; (b) Desvio-padrão da observável estimado de acordo com os modelos de Conker e $\alpha\text{-}\mu$. Dados coletados na estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014.	73
Figura 25 – Cintilação observada na estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014.	85
Figura 26 – Cintilação observada na estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014.	85
Figura 27 – Comparação entre o PPP com diferentes modelagens estocásticas: (a) padrão, (b) modelo de Conker e (c) modelo $\alpha\text{-}\mu$. Resultados para o dia 307/2014 – estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.	86
Figura 28 – Comparação da precisão do PPP com diferentes modelagens estocásticas: (a) padrão, (b) modelo de Conker e (c) modelo $\alpha\text{-}\mu$. Resultados para o dia 307/2014 – estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014. A precisão dos componentes é representada considerando um SGL.	87
Figura 29 – Comparação entre o PPP com diferentes modelagens estocásticas: (a) padrão, (b) modelo de Conker e (c) modelo $\alpha\text{-}\mu$. Resultados para o dia 311/2014 – estação SJCUColetados na noite de 17 de Novembro de 2014. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.	88
Figura 30 – Estimativa de $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}$: (a) estimativa do componente de alta frequência; (b) estimativa do componente de baixa frequência; (c) estimativa final; (d) intensidade normalizada do sinal a 50 Hz.	91
Figura 31 – Avaliação inicial da correção $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}$: observável original e observável corrigida.	92
Figura 32 – Função de mapeamento para o desvio-padrão da fase de acordo com o valor de $dScint_{\phi_{L_i}}$	94

- Figura 33 – As barras verticais apresentam a comparação entre o *REM-Q-3D* das soluções PPP padrão e PPP com mitigação (Estação SJC - Novembro/2014). O período de convergência considerado (30 minutos iniciais) não foi utilizado no cálculo das estatísticas do *REM-Q-3D*. As linhas pontilhadas representam a quantidade de perdas de ciclo identificadas pelo RT-PPP: (a) média do *REM-Q-3D* e número de perdas de ciclo; (b) desvio-padrão do *REM-Q-3D* e número de perdas de ciclo. 99
- Figura 34 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 307/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP. . . 101
- Figura 35 – Análise das precisões das estimativas de coordenadas nas componentes Norte, Leste e Vertical (conforme obtidas na MVC dos parâmetros ajustados do PPP): (a) precisões obtidas no PPP padrão (sem mitigação) e (b) precisões obtidas no PPP com mitigação para o dia 307/2014 – estação SJC. 102
- Figura 36 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 315/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP. . . 103
- Figura 37 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 319/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP. . . 104
- Figura 38 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 326/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP. . . 105

Figura 39 – As barras verticais apresentam a comparação entre o <i>REM-Q-3D</i> das soluções PPP padrão e com mitigação (Estação PRU2 - Novembro/2014). O período de convergência considerado (30 minutos iniciais) não foi utilizado no cálculo das estatísticas do <i>REM-Q-3D</i> . As linhas pontilhadas representam a quantidade de perdas de ciclo identificadas pelo RT-PPP: (a) média do <i>REM-Q-3D</i> e número de perdas de ciclo; (b) desvio-padrão do <i>REM-Q-3D</i> e número de perdas de ciclo.	107
Figura 40 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 307/2014 (PRU2). A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP. . . .	109
Figura 41 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 317/2014 (PRU2). A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.	110
Figura 42 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 332/2014 (PRU2). A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.	111
Figura 43 – (a) Mapa de índice S4 esperado obtido pelo WBMOD. Fonte: NorthWest Research Associates, Inc. (NWRA) (2011); (b) Mapa de índice S4 esperado obtido pelo GISM. Fonte: adaptado de Béniguel e Hamel (2011).	119
Figura 44 – Exemplo de mapa de cintilação (S4) disponibilizado pelo INPE para o dia 06 de Novembro de 2014 às 23:40 (UTC). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2014).	120
Figura 45 – Estações de monitoramento disponíveis na base de dados integrada (CIGALA/CALIBRA, LISN e ICEA.	125
Figura 46 – Comparativo de dados da estação SLMA (CIGALA/CALIBRA) e LSLZ (LISN). Dados obtidos para o satélite GPS 18 no dia 31 de Outubro de 2014.	126
Figura 47 – (a) IPPs projetados em células de uma grade considerando uma única época t e exibindo um caso em que uma mesma célula contém IPPs provenientes de dois satélites diferentes (satélites A e B); (b) Detalhamento para projeção dos IPPs dos satélites A e B considerando uma resolução temporal de cinco minutos (t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5).	127

Figura 48 – Passos para a geração dos mapas observados: (a) valores de índice S4 projetados no IPP ao longo de cinco minutos; (b) representação aproximada (<i>zoom</i>) na região Nordeste para melhor visualização da etapa apresentada em (a); (c) cálculo da média dos valores acumulados em cada célula de resolução definida; (d) interpolação para obtenção da representação gráfica final e exibição das estações de origem dos dados.	129
Figura 49 – Comparação entre diferentes funções de agregação: (a) média; (b) máximo; (c) desvio-padrão. Mapas para a noite de 03 de Novembro de 2014, para às 20:30 (UT-3).	130
Figura 50 – Mapas de cintilação para a noite de 30 de outubro de 2014, para às 18:30 (a), 19:30 (b), 20:30 (c), 21:30 (d), 22:30 (e) e 23:30 (f), todos no tempo UT-3.	132
Figura 51 – Elemento básico de uma rede neural: neurônio. Baseado em Samarasinghe (2006, p.17).	134
Figura 52 – Processamento em um neurônio. Baseado em Samarasinghe (2006, p.17).	134
Figura 53 – Modelo de rede neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC).	135
Figura 54 – Modelo de rede neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC) com camada de viés.	137
Figura 55 – Funções de ativação comumente utilizadas no PMC para problemas não-lineares: (a) função logística; (b) função tangente hiperbólica.	138
Figura 56 – Configuração de rede neural PMC utilizado no modelo preditivo.	146
Figura 57 – Convergência da rede neural após iterações.	148
Figura 58 – Etapas envolvidas no contexto da recuperação de dados da base de dados integrada.	149
Figura 59 – Representação gráfica de exemplos de dados de treinamento (com saídas conhecidas) para a noite de 02/11/2014 considerando $t=19:30$ e $t_p=21:30$. (a) atributo de entrada e_1 ; (b) atributo de entrada e_2 ; (c) atributo de saída s_1 .	150
Figura 60 – Comparação entre mapas preditos (à esquerda) e observados (à direita): (a) Mapa predito para [20:30-20:35] com uma 1 hora de antecedência; (b) Mapa observado para [20:30-20:35]. (c) Mapa predito para [21:30-21:35] com 2 horas de antecedência; (d) Mapa observado para [21:30-21:35]; (e) Mapa predito para [22:30-22:35] com 3 horas de antecedência; (f) Mapa observado para [22:30-22:35].	152
Figura 61 – Representação gráfica para a rede neural treinada baseada no método descrito em Özesmi e Özesmi (1999). Os pesos positivos são representados por linhas pretas, e os pesos negativos são representados por linhas cinzas. A espessura das linhas indica a magnitude relativa dos pesos.	153

Figura 62 – Comparação de diferentes intervalos de predição: (a) Mapa predito para [23:30-23:35] com 4 horas de antecedência; (b) Mapa predito para [23:30-23:35] com 3 horas de antecedência; (c) Mapa predito para [23:30-23:35] com 2 horas de antecedência; (d) Mapa predito para [23:30-23:35] com 1 hora de antecedência; (e) Mapa observado para [23:30-23:35].	154
Figura 63 – Comparação de indicadores de erro para diferentes intervalos de predição.	156
Figura 64 – Comparação entre mapa predito e mapa observado para às 22:30 do dia 24/11/2014, bem como mapa de resíduos: (a) Mapa predito para [23:30-23:35] com 1 hora de antecedência; (b) mapa observado para [22:30-22:35]; (c) mapa dos resíduos da predição.	158
Figura 65 – Comparação entre mapa observado e mapas preditos para às 22:30 do dia 25/11/2014 com diferentes janelas de predição: (a) mapa observado; (b) predição com uma 1 hora de antecedência; (c) predição com 2 horas de antecedência; (d) predição com 3 horas de antecedência.	159
Figura 66 – Comparação entre mapa observado e mapas preditos para às 22:30 do dia 18/11/2014 com diferentes janelas de predição: (a) mapa observado; (b) predição com uma 1 hora de antecedência; (c) predição com 2 horas de antecedência; (d) predição com 3 horas de antecedência.	160
Figura 67 – Comparação entre mapa observado e mapas preditos para às 22:30 do dia 27/11/2014 com diferentes janelas de predição: (a) mapa observado; (b) predição com uma 1 hora de antecedência; (c) predição com 2 horas de antecedência; (d) predição com 3 horas de antecedência.	161

Lista de Abreviaturas

BISM	<i>Brazilian Ionospheric Scintillation Model</i>
C/A	<i>Coarse/acquisition</i>
C/N ₀	<i>Carrier-to-noise ratio</i>
CALIBRA	<i>Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CET	Conteúdo Eletrônico Total
CIGALA	<i>Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DLL	<i>Delay Locked Loop</i>
DOP	Diluição de Precisão
DOY	<i>Day of year</i> (dia do ano)
Dst	<i>Disturbance Storm-Time</i>
dTEC	diferença de TEC
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay System</i>
ESF	<i>Equatorial Spread-F</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FCT/UNESP	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GAGAN	<i>GPS Aided Geo Augmentation Network</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GBSC	<i>Ground Based Scintillation Climatology</i>

GEGE	Grupo de Estudos em Geodésia Espacial
GIB	Grade Ionosférica Brasileira
GISM	<i>Global Ionospheric Scintillation Propagation Model</i>
GLONASS	<i>GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
INGV	<i>Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IONEX	<i>Ionosphere Map Exchange</i>
IPP	<i>Ionospheric Pierce Point</i>
ISMR	<i>Ionospheric Scintillation Monitor Receiver</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LGE	Laboratório de Geodésia Espacial
LISN	<i>Low-Latitude Ionospheric Scintillation Network</i>
LPIM	<i>La Plata Ionospheric Model</i>
LT	<i>Local time</i> (tempo local)
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
MVC	Matriz de Variância e Covariância
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRCAN	<i>Natural Resources Canada</i>
NWRA	<i>Northwest Research Associates, Incorporated</i> (NWRA)
PDSE	Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PMC	Perceptron de Múltiplas Camadas
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRN	<i>Pseudorandom noise</i>
PSD	Power Spectral Density
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
REMQ	Raiz do erro-médio-quadrático
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RNA	Rede Neural Artificial
RT	Rayleigh-Taylor
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SBAS	<i>Space-Based Augmentation System</i>
SGL	Sistema Geodésico Local
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
SVID	<i>space vehicle identifier</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	TEC <i>unit</i>
TOW	<i>time of week</i>
UNOESTE	Universidade do Oeste Paulista

UT	<i>Universal Time</i> (tempo universal)
VMF	<i>Vienna Mapping Function</i>
vTEC	TEC vertical
WAAS	<i>Wide-Area Augmentation System</i>
WBMOD	<i>Wideband Ionospheric Scintillation Model</i>

Lista de Quadros

2.1	Diferentes tipos de dados e principais características.	37
2.2	Subconjunto extraído de arquivo bruto coletado a 50 Hz pelo receptor Septentrio PolaRxS PRO. Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.	39
4.1	Quantidade de variâncias faltantes pelos modelos de Conker e $\alpha\text{-}\mu$. Dados da estação SJCUC do período de 1 a 10 de Novembro de 2014, período das 19:00 às 21:00 (UT-3).	83
4.2	Resultados numéricos do processamento de dados da estação SJCUC – Novembro/2014.	85
4.3	Comparativo entre diferentes configurações de PPP no contexto de cintilação ionosférica.	95
4.4	Resultados numéricos do processamento de dados da estação SJCUC – Novembro/2014.	100
4.5	Resultados numéricos do processamento de dados da Estação PRU2 – Novembro/2014.	108
5.1	Conjuntos de treinamento e testes considerando dados de séries temporais. Baseado em Weiss e Indurkha (1998).	143
5.2	Pesos finais (após o treinamento).	153
5.3	Pesos iniciais (definidos aleatoriamente).	153

Sumário

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Objetivos	27
1.2	Justificativas	28
1.3	Organização do Documento	29
2	IONOSFERA E CINTILAÇÃO NO CONTEXTO DO GNSS	30
2.1	Introdução à Ionosfera	30
2.1.1	Refração Ionosférica	32
2.2	Cintilação Ionosférica	33
2.2.1	Monitoramento por GNSS e Principais Índices	36
2.3	Aspectos da climatologia da cintilação sob a perspectiva do monitoramento pela Rede CIGALA/CALIBRA	47
2.3.1	Influência dos Ciclos de Atividade Solar e Variações Sazonais	47
2.3.2	Influência do Horário Local e Variabilidade Diária	51
2.3.3	Influência da Localização Geográfica	52
2.3.4	Influência da Atividade Magnética	53
2.4	Propagação de sinais em alinhamento com as irregularidades na ionosfera	55
3	EFEITO DA CINTILAÇÃO NO GNSS	61
3.1	Efeitos nas observáveis e no posicionamento	61
3.2	Modelos para a Variância do Erro de Rastreamento	65
3.2.1	Exemplos de variância estimada pelos modelos	70
3.3	Discussão e comentários	73
4	MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO PPP	75
4.1	Modelo funcional e estocástico no PPP	76
4.1.1	Modelo funcional no PPP padrão	76
4.1.2	Modelo estocástico no PPP padrão	78
4.1.3	Modelo estocástico no PPP em abordagens de mitigação existentes	79
4.1.4	Aplicação dos modelos Conker e $\alpha\text{-}\mu$ no PPP com mitigação	81
4.2	Método de mitigação proposto	89
4.2.1	Modelo funcional proposto	89
4.2.2	Modelo estocástico proposto	92
4.2.3	Estratégia para minimizar os efeitos de perdas de sincronismo	94

4.3	Resultados do método proposto	95
4.3.1	Dados coletados em São José dos Campos/SP	96
4.3.2	Dados coletados em Presidente Prudente/SP	106
4.4	Discussão e Conclusões	112
4.5	Recomendações para Trabalhos Futuros	113
5	PREDIÇÃO DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA	116
5.1	Modelos Existentes	117
5.2	Abordagem Proposta	123
5.2.1	Integração de Bases de Dados de Monitoramento de Cintilação por GNSS e disponibilização via software ISMR Query Tool	124
5.2.2	Mapas de Cintilação Observados	126
5.2.3	Modelo Preditivo e Mapas de Cintilação Preditos	133
5.2.3.1	Rede Neural Artificial	133
5.2.3.2	Validação cruzada	141
5.2.3.3	Atributos de entrada e saída do modelo preditivo	143
5.2.3.4	Treinamento, Teste e Validação da Rede Neural	146
5.2.4	Resultados do modelo preditivo	150
5.3	Discussão	162
5.4	Recomendações para Trabalhos Futuros	164
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	166
	REFERÊNCIAS	169
	APÊNDICES	181
	APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CÁLCULO DOS ÂNGULOS	
	γ E β	182

1 Introdução

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – *GNSS*) são constituídos por constelações de satélites que proporcionam – por meio da transmissão de sinais de rádio em frequências específicas – a obtenção de medidas de distância satélite-receptor com as quais se pode determinar a posição de um objeto na Terra (ou próximo a ela). Este tipo de tecnologia é atualmente empregada em diversos segmentos, como a navegação, agricultura de precisão, topografia, aeronáutica, dentre outros. Atualmente, destacam-se o sistema norte-americano *Global Positioning System* (GPS), o russo *GLobal'naya NAvigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema* (GLONASS), o europeu Galileo e o chinês *BeiDou-Compass*. Além dos sistemas mencionados, segmentos de complemento também compõem o GNSS. Neste segmento, destacam-se os sistemas baseados em redes de estações terrestres e satélites geoestacionários (denominados *Space-Based Augmentation System* – SBAS), como o norte-americano *Wide-Area Augmentation System* (WAAS), o indiano *GPS Aided Geo Augmentation Network* (GAGAN), o japonês *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS), o europeu *European Geostationary Navigation Overlay System* (EGNOS), dentre outros. Destacam-se também os sistemas baseados em redes locais de estações terrestres (*Ground-Based Augmentation System* – GBAS) – os quais são comumente empregados em aeroportos para suporte à operações na aviação (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008).

Diferentes métodos de se obter posição com GNSS podem ser utilizados, tanto em aplicações em tempo real como no modo de pós-processamento de dados. Novas abordagens surgem acompanhando a evolução dos satélites, avanços no hardware de receptores e a possibilidade de transmissão de dados em tempo real pela internet. Dentre os métodos de posicionamento, destaca-se o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) – um método de posicionamento absoluto (pressupõe a utilização de apenas um receptor GNSS) (ZUMBERGE et al., 1997). No PPP, busca-se corrigir todos os efeitos sistemáticos que figuram no cenário satélite-receptor, permitindo assim alcançar acurácia centimétrica. Destaca-se que, em pesquisas anteriores realizadas no contexto da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (FCT/UNESP), um software científico para PPP foi desenvolvido, denominado RT-PPP (MARQUES, 2012; MARQUES et al., 2014).

Para o desenvolvimento e avaliação de diferentes métodos de posicionamento – bem como para a realização de pesquisas em outras áreas envolvendo dados GNSS – pesquisadores podem recorrer a dados oriundos de redes de monitoramento contínuo. Um exemplo é a rede do *International GNSS Service* (IGS), a qual conta com receptores distribuídos por todo o mundo. Outro exemplo é a Rede Brasileira de Monitoramento

Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), atualmente administrada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As antenas dos receptores GNSS destas redes são normalmente instaladas sobre marcos geodésicos e permanecem estáticas coletando dados de maneira ininterrupta; usualmente, esta infraestrutura (marco, antena, receptor e periféricos) é denominada estação GNSS. Para disponibilização dos dados destas redes visando garantir a interoperabilidade entre diferentes sistemas GNSS e diferentes fabricantes de receptores, recorre-se usualmente a formatos padrão de arquivos. Dentre estes padrões, destaca-se o *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), um padrão estabelecido desde 1989 que abrange formatos específicos para disponibilização de arquivos com as observáveis GNSS (RINEX de observação) e arquivos de efemérides transmitidas pelos satélites (RINEX de navegação) (GURTNER; ESTEY, 2007).

Dentre os inúmeros efeitos que ocorrem no sinal transmitido pelo satélite em seu percurso até chegar à antena do receptor, destacam-se aqueles causados durante a propagação do sinal pela atmosfera terrestre. Na atmosfera, sobretudo em uma região localizada aproximadamente entre 50 até 1000 km de altitude em relação à superfície terrestre (compreendendo a ionosfera), estão presentes os efeitos mais significativos. A ionosfera é uma camada caracterizada pela presença de íons e elétrons livres. Alguns fenômenos físico-químicos fazem com que haja constante interação entre ambos. Estes fenômenos estão relacionados a diversos fatores, como atividade solar, horário local, sazonalidade e localização geográfica. No contexto do GNSS, esta interação é a causa de efeitos como a refração ionosférica e as cintilações ionosféricas (McNAMARA, 1991; SEEGER, 2003). Os efeitos causados pela refração ionosférica nos sinais GNSS são bem modelados com estratégias consolidadas na literatura, tais como o uso de receptores multi-frequência, modelos de ionosfera ou algoritmos. No entanto, as cintilações ionosféricas ainda impõem limitações significativas à tecnologia GNSS, razão que motivou o desenvolvimento desta tese.

As cintilações ionosféricas são caracterizadas por rápidas variações na amplitude e/ou fase de um sinal de rádio ao se propagar por irregularidades na densidade de elétrons na ionosfera (CONKER et al., 2003). A dimensão espacial destas irregularidades que causam as cintilações é normalmente inferior ao comprimento da 1ª zona de Fresnel, definido por $(\lambda h_i)^{0,5}$, onde h_i é a altitude considerada da ionosfera (tipicamente definida entre 350 e 400 km) e λ é o comprimento de onda do sinal (ALFONSI et al., 2011; MUELLA; de PAULA; MONTEIRO, 2013). Considerando a altitude de base $h_i=350$ km, resulta em irregularidades de aproximadamente 275, 312 e 319 m para as frequências utilizadas pelo GPS L1, L2 e L5, respectivamente. As irregularidades de pequena escala podem estar embutidas em irregularidades de escalas maiores, as quais também são conhecidas como bolhas ionosféricas. As bolhas podem variar significativamente em extensão. Rezende et al. (2007) apresenta estimativas da dimensão das bolhas na região equatorial brasileira, as quais podem chegar a cerca de 480 km na direção leste-oeste e cerca de 1400 km na

direção norte-sul.

As medidas de distância obtidas pelos receptores GNSS (observáveis de pseudodistância e fase) podem ser degradadas de maneira única conforme o sinal se propaga por tais irregularidades (AQUINO et al., 2009). Além da degradação das medidas, perdas de ciclo e perda de sincronismo¹ também podem ocorrer. Num caso extremo, se não houver um número mínimo de satélites sendo rastreado com sucesso, ocorre a perda do serviço de posicionamento (CONKER et al., 2003; DATTA-BARUA et al., 2003).

Efeitos como as cintilações ionosféricas impedem que o GNSS seja a única tecnologia para se determinar posição em aplicações onde a confiabilidade deste serviço é essencial (PRASAD; RUGGIERI, 2005). Um exemplo é visto na navegação aérea, que requer determinados níveis de acurácia, integridade, disponibilidade e continuidade (INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), 2013). Outro exemplo pertinente são as aplicações *offshore*, como a extração de petróleo (TIWARI; STRANGEWAYS; SKONE, 2013). A ausência do serviço de posicionamento pode ocasionar a interrupção do serviço de extração de petróleo, causando prejuízos financeiros significativos. De maneira similar, prejuízos também são causados na agricultura de precisão, uma vez que aplicações como a navegação autônoma por GNSS podem ser interrompidas devido à incidência de cintilação (MENDONÇA; MONICO; MOTOKI, 2012).

Receptores GNSS específicos podem ser utilizados no monitoramento de cintilação ionosférica, os quais são denominados *Ionospheric Scintillation Monitor Receivers* (ISMR). Este tipo de receptor provê estimativas de parâmetros de cintilação ionosférica para cada satélite rastreado. Dentre os parâmetros estimados, destacam-se os índices S4 e Sigma-phi, os quais representam medidas práticas acerca das cintilações de amplitude e de fase, respectivamente (DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993; AQUINO et al., 2009).

No contexto da FCT/UNESP, estações de monitoramento de cintilação ionosférica foram implantadas no território brasileiro a partir de Fevereiro de 2011 com suporte dos Projetos 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*) e Projeto GNSS-SP (Processo FAPESP 06/04008-2), constituindo uma base rica para realização de pesquisas relacionadas à ionosfera e os efeitos da cintilação. Os projetos CIGALA e CALIBRA – que foram financiados pela Comunidade Européia e FAPESP – envolveram diversas instituições do Brasil e da Europa, dentre as quais esteve inserida FCT/UNESP. Atualmente, as estações de monitoramento constituem a rede denominada CIGALA/CALIBRA, a qual vem sendo mantida pela FCT/UNESP com o apoio de parceiros.

Além da infraestrutura de monitoramento atualmente disponível, uma infraestrutura

¹ Uma perda de sincronismo é caracterizada pela interrupção do rastreamento do sinal. Na literatura também comparece a denominação perda de *lock*.

de análise foi implantada, a qual compreende o pré-processamento automatizado dos dados e aplicação de distintas técnicas de mineração e visualização de dados para suporte à análise dos mesmos. Estes recursos estão disponíveis no software desenvolvido – denominado ISMR Query Tool² (VANI, 2014; VANI; SHIMABUKURO; MONICO, 2017).

Nesta pesquisa, propõe-se a realização de investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica aplicados à região brasileira, explorando-se a infraestrutura de monitoramento e análise atualmente disponíveis na FCT/UNESP e dando continuidade a trabalhos anteriores recentemente realizados no contexto do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) da FCT/UNESP.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo geral a realização de investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica aplicados à região brasileira. Os objetivos específicos compreendem:

- avaliação dos efeitos da cintilação nas observáveis GNSS, sobretudo na pseudodistância e na fase da onda portadora;
- investigações sobre abordagens existentes para mitigação dos efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS;
- investigações para a adaptação e/ou desenvolvimento de novas abordagens para mitigação de cintilação ionosférica no PPP (com o suporte do software científico RT-PPP);
- desenvolvimento de melhorias na infraestrutura de análise atualmente disponível na FCT/UNESP centrada no software ISMR Query Tool;
- aplicação de técnicas de mineração de dados preditiva aplicadas à predição de cintilação ionosférica;
- desenvolvimento de metodologias para o desenvolvimento de mapas e/ou visualizações interativas acerca da atividade ionosférica no território brasileiro, os quais possuem potencial de disponibilização à comunidade pela internet para suporte a diferentes aplicações baseadas na tecnologia GNSS.

² O software ISMR Query Tool pode ser acessado pela internet, disponível em <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/>>.

1.2 Justificativas

Os efeitos causados pela cintilação ionosférica podem interferir negativamente no GNSS, acarretando principalmente em redução da acurácia do posicionamento. Como o uso deste tipo de sistema tem se tornado essencial para algumas atividades, como agricultura de precisão e aplicações *offshore*, a contribuição no contexto da mitigação de cintilação ionosférica é uma maneira de colaborar indiretamente com estas áreas de aplicação. Em complemento, a predição de eventos de cintilação ionosférica pode permitir aos usuários o planejamento de estratégias com antecedência. Por exemplo, em aplicações onde a segurança é essencial, pode-se optar pelo uso de tecnologias alternativas ao GNSS durante os períodos esperados de deteriorações causadas por cintilações fortes. Logo, a realização deste projeto representa contribuição para o desenvolvimento científico e tecnológico brasileiros, além do desenvolvimento econômico, uma vez que os resultados almejados têm potencial de aplicação em diversos segmentos que utilizam a tecnologia de posicionamento GNSS.

As melhorias no software ISMR Query Tool possuem potencial de promoção do ensino, formação e aprendizado, uma vez que agregam novos recursos à infraestrutura de monitoramento e análise atualmente disponíveis. Tais recursos proporcionam, atualmente, suporte à realização de diversos projetos de pesquisa, trabalhos científicos, dissertações e teses em instituições do Brasil e do mundo (por exemplo, em Mendonça, Monico e Motoki (2012), Mendonça (2013), Marques (2013), Vani et al. (2014), Pereira (2015), Park et al. (2016), Pereira e Camargo (2017), Park et al. (2017), Rocha et al. (2017), Moraes et al. (2017), Brassarote, Souza e Monico (2018), Moraes et al. (2018), dentre outros). Destaca-se a caracterização de um cenário adequado para a realização de pesquisas associadas à GNSS e cintilação, já que se dispõe de uma rede de monitoramento com razoável cobertura e receptores multi-frequência coletando dados desde a ascensão de um ciclo solar, compreendendo também seu pico e seu declínio.

Esta pesquisa também representa continuidade ou está relacionada a diversas pesquisas recentes de Mestrado e Doutorado realizadas no âmbito do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial da FCT/UNESP. Além da pesquisa de mestrado do presente autor (VANI, 2014), destacam-se ainda outros trabalhos, como Marques (2012), que contempla o desenvolvimento de um software científico para PPP; Mendonça (2013), que aborda os efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS incluindo experimentos na agricultura de precisão; Marques (2013), que apresenta investigações sobre modelos de mitigação de cintilação ionosférica; Silva (2014), que investiga os efeitos da cintilação no posicionamento relativo com a técnica *Real Time Kinematic* (RTK); Pereira (2015), que aborda o monitoramento de irregularidades na ionosfera e cintilações por meio de diferentes indicadores; Prol (2015), que aborda a utilização de métodos para a reconstrução tomográfica da ionosfera na região brasileira; Lima (2015), que dentre suas investigações

inclui a análise de diferentes configurações de PPP em períodos de cintilação; Arana (2016), que investiga o uso de redes neurais para a modelagem de superfícies de distorção de modelos geoidais e Jerez (2017), que investiga a utilização conjunta de GPS e GLONASS sob efeito de cintilação ionosférica em diferentes métodos de posicionamento.

Por fim, destaca-se ainda a inserção deste projeto no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) “Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (GNSS - NavAer)”. Tal projeto está inserido no monitoramento da atmosfera, incluindo aspectos relacionados aos efeitos da cintilação ionosférica no sinal GNSS, com ênfase em aplicações na navegação aérea com confiabilidade e segurança dentro do território brasileiro. Além da FCT/UNESP, participam do projeto outras instituições, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Tal projeto, que é financiado pelo CNPq, CAPES e FAPESP (processo CNPq 465648/2014-2), visa dar suporte à implantação do sistema GBAS no Brasil.

1.3 Organização do Documento

Além dos aspectos introdutórios já apresentados, este documento está organizado em mais 5 capítulos. No Capítulo 2, características da ionosfera e das cintilações ionosféricas são apresentadas. São descritos os principais índices de cintilação utilizados e aspectos gerais sobre a climatologia das cintilações conforme observada nos dados de monitoramento gerenciados pela FCT/UNESP nos últimos anos. Também são apresentadas investigações sobre métricas alternativas (recentemente definidas na literatura) que podem auxiliar na descrição da cintilação ionosférica. No Capítulo 3, são apresentados aspectos sobre os efeitos da cintilação nas observáveis GNSS, além de modelos que descrevem o erro de rastreamento esperado em um sinal GNSS sob incidência de cintilação. No Capítulo 4, a mitigação dos efeitos da cintilação no posicionamento GNSS é o assunto principal. São apresentadas abordagens de mitigação existentes, bem como a nova abordagem proposta. Os resultados obtidos pela aplicação da abordagem proposta são apresentados, cujos dados foram processados com o suporte do software científico RT-PPP (MARQUES, 2012; MARQUES et al., 2014). No Capítulo 5, a predição de cintilação ionosférica é discutida. Também são apresentados modelos existentes e o modelo preditivo proposto. Por fim, conclusões e considerações finais são apresentados no Capítulo 6.

2 Ionosfera e Cintilação no Contexto do GNSS

2.1 Introdução à Ionosfera

A ionosfera é uma camada com altitude que se estende aproximadamente entre 50 a 1000 km em relação à superfície terrestre. Tal camada é caracterizada pela presença de íons e elétrons livres e a constante interação entre ambos é suficiente para afetar a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). A presença de íons e elétrons é proporcional à intensidade de radiação solar e à densidade de gases da atmosfera. A distribuição espacial dos íons e elétrons é determinada principalmente por processos fotoquímicos e processos de transporte. Os processos fotoquímicos estão relacionados à intensidade de radiação solar, a qual implica em diferentes taxas de produção e perda de partículas ionizadas. Já os processos de transporte causam o movimento de camadas ionizadas (SEEBER, 2003).

A influência da densidade de elétrons na propagação de um sinal GNSS é dependente do conteúdo total de elétrons presente na trajetória satélite-receptor. Este conteúdo é denominado TEC (*Total Electron Content*), ou, em Português, CET (Conteúdo Eletrônico Total). O TEC é definido na Equação 2.1 e representa o número total de elétrons presentes em uma coluna com área seccional de 1 m^2 abrangendo a trajetória s do sinal, do satélite S até o receptor R . O TEC é normalmente expresso em TECU (*TEC unit*); 1 TECU equivale à $1 \cdot 10^{16}$ elétrons/ m^2 (SEEBER, 2003).

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds \quad (2.1)$$

O TEC varia no tempo – apresentando variações diárias, sazonais e em ciclos de longo período de acordo com o ciclo solar – e no espaço – apresentando variações de acordo com a localização geográfica (MONICO, 2008). Combinações lineares de observáveis de pseudodistância ou fase obtidas em dupla-frequência podem ser utilizadas para obter uma estimativa do TEC na trajetória do sinal de um satélite S ao receptor R (MATSUOKA; CAMARGO, 2004). Nestas combinações, considera-se a trajetória inclinada do sinal, ou seja, sua trajetória real.

Para efeitos de comparações, modelagens ou simplificações, pode-se definir o TEC na vertical (vTEC). Neste caso, trajetórias verticais e inclinadas são relacionadas por meio de uma função de mapeamento. As funções de mapeamento podem levar em consideração um ângulo zenital z' de acordo com o esquema apresentado na Figura 1. Neste esquema, define-se uma camada com certa altitude h_i na ionosfera (normalmente admite-se $h_i \approx 350 \text{ km}$).

Obtém-se então z' – um ângulo formado entre a trajetória do sinal, partindo-se do satélite S ao receptor R , e um plano de altitude média h_i . Na Figura 1, identifica-se ainda o raio da Terra (R_t), o ponto sub-ionosférico, o ponto ionosférico – normalmente denominado IPP (*Ionospheric Pierce Point*) –, o ângulo zenital (z) e o ângulo de elevação do satélite (E). Esta representação é comumente denominada modelo de camada simples da ionosfera (SEEGER, 2003). Destaca-se que, além da representação de camada simples, outras também são descritas na literatura, tais como abordagens multi-camadas, assimilação de dados e reconstrução tomográfica da ionosfera (PROL, 2015; PROL; CAMARGO; MUELLA, 2017b; PROL; CAMARGO; MUELLA, 2017a).

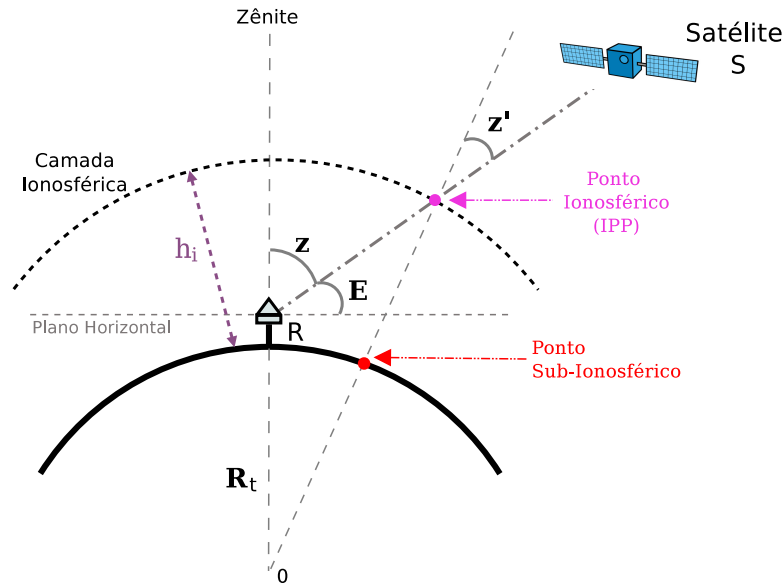


Figura 1 – Representação gráfica para o modelo de camada simples da ionosfera. Baseado em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001) e Seeber (2003).

Um exemplo de função de mapeamento utilizada para relacionar valores de $vTEC$ a direções inclinadas é apresentado na Equação 2.2. Nesta relação, considera-se o ângulo z' para estabelecer a relação:

$$vTEC = \cos(z') \cdot TEC \quad (2.2)$$

Ao se propagar pela ionosfera, os sinais GNSS podem sofrer efeitos de refração (atraso ou avanço aparente do sinal) e flutuações (variações de amplitude e/ou fase, as quais denominamos cintilações). Embora estes efeitos sejam comumente descritos na literatura como refração ionosférica e cintilação ionosférica, respectivamente, é importante deixar claro que se trata, na verdade, da refração (ou da cintilação) dos sinais GNSS ao se propagarem pela ionosfera, e não da ionosfera em si.

Modelar os efeitos da refração ou da cintilação ionosférica no contexto do posicionamento GNSS requer abordagens distintas, uma vez que as consequências destes efeitos

nas observáveis GNSS são diferentes.

A subseção 2.1.1 apresenta alguns aspectos relacionados à refração. Embora este projeto tenha como finalidade investigações acerca das cintilações, é necessário destacar alguns aspectos das refrações que posteriormente podem ser relacionados às cintilações. Na sequência, na seção 2.2, são introduzidos aspectos sobre a cintilação.

2.1.1 Refração Ionosférica

A refração ionosférica pode ser definida como o atraso (ou o avanço) aparente do sinal devido à ionosfera. Considerando o contexto do GNSS, a ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, a velocidade de propagação varia de acordo com a frequência do sinal. Este efeito dispersivo é causado por interações eletromagnéticas entre o meio de propagação (neste caso, a ionosfera, caracterizada por sua densidade eletrônica) e o sinal.

Em um meio dispersivo, é possível notar que a velocidade de propagação de uma onda senoidal (v_f) e a velocidade de propagação de um grupo de ondas senoidais (v_g) são diferentes: v_f pode superar a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo ($c = 299792458$ m/s), enquanto v_g não pode superar c (SEEBER, 2003). Neste contexto, caracteriza-se o efeito da refração ionosférica como um avanço, para o caso da observável de fase, ou como um atraso, no caso de observável baseada em um grupo de ondas (caso da pseudodistância). Ambos são relacionados à frequência do sinal f .

Nas observáveis GNSS, o erro devido à refração ionosférica (em metros), com relação à suposição $v = c$, é determinado em função do TEC. Esta determinação é apresentada nas Equações 2.3 e 2.4 para as observáveis de fase ($I_{r(\Phi)}^s$) e de pseudodistância ($I_{r(PD)}^s$), respectivamente (ambas também expressas em metros). Observa-se que para a fase, tem-se o sinal negativo, representando o avanço da fase. Para a pseudodistância, tem-se o sinal positivo, representando o atraso na propagação de um grupo de ondas (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

$$I_{R(\Phi)}^s = -\frac{40,3 \cdot TEC}{f^2} \quad (2.3)$$

$$I_{R(PD)}^s = \frac{40,3 \cdot TEC}{f^2} \quad (2.4)$$

Destaca-se que em um meio não dispersivo, tal qual a troposfera, tem-se que $v_g = v_f$. Este detalhe faz com que normalmente os efeitos da ionosfera e da troposfera no contexto do GNSS sejam modelados separadamente (SEEBER, 2003).

Para receptores GNSS de simples frequência, uma alternativa para modelar o efeito da refração ionosférica é a utilização de modelos globais cujos coeficientes são transmitidos

pelos satélites em tempo real. Para o caso do GPS, tem-se o Modelo de Klobuchar – um algoritmo que proporciona uma atenuação de aproximadamente 50% do efeito do atraso ionosférico no sinal (KLOBUCHAR, 1987). Para o caso do Galileo, tem-se o modelo NeQuick (EUROPEAN COMISSION, 2016).

Outra possibilidade para receptores de simples frequência é a utilização de mapas de $vTEC$, os quais são normalmente disponibilizados no formato padrão IONEX (*Ionosphere Map Exchange*) por centros especializados como o IGS. Tais produtos podem ser derivados por modelos regionais ou globais da ionosfera, e são gerados principalmente a partir de observações de redes de estações GNSS de referência. Dentre os modelos regionais, pode-se destacar o modelo para a região brasileira denominado Mod_Ion – desenvolvido no Departamento de Cartografia da FCT/UNESP (CAMARGO, 1999), e o modelo Grade Ionosférica Brasileira (GIB) (AGUIAR; KOZELINSKI, 2015). Para a região da América do Sul, destaca-se o *La Plata Ionospheric Model* (LPIM) (BRUNINI et al., 2008). Os mapas de $vTEC$ contém valores absolutos (em TECU) em cada célula de uma grade considerando uma época t de referência. Uma vez determinadas as coordenadas aproximadas do usuário, pode-se realizar interpolações entre as vizinhanças temporal e espacial dos valores da grade para a determinação do valor do $vTEC$ na região desejada. Outra possibilidade (menos recomendada) é adotar o valor mais próximo no tempo e no espaço para a escolha do valor de $vTEC$ nesta grade (SCHAER; GURTNER; FELTENS, 1998; AGUIAR; CAMARGO, 2012). Em seguida, tal valor pode ser mapeado para as direções dos satélites (ângulo z') para a determinação do atraso ionosférico considerando a trajetória inclinada do sinal.

Para o caso de receptores multi-frequência e exemplificando-se para o caso do GPS – no qual os sinais são transmitidos originalmente em duas frequências L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz) –, os usuários podem realizar uma combinação linear para eliminar mais de 99% dos efeitos da refração ionosférica. Esta combinação é denominada *ion-free* (KLOBUCHAR, 1987; MONICO, 2008). Atualmente, destaca-se que a terceira portadora L5 (1176,45 MHz) está disponível nos satélites GPS mais modernos, permitindo também a realização de combinações lineares com esta portadora.

2.2 Cintilação Ionosférica

A cintilação ionosférica é caracterizada por rápidas variações na amplitude e/ou fase de um sinal de rádio ao se propagar por irregularidades na densidade de elétrons na ionosfera (CONKER et al., 2003).

Considerando as regiões equatoriais¹ e de baixas latitudes, as cintilações figuram como uma das manifestações das irregularidades de camada F espalhada (na literatura comparece o termo em inglês *Equatorial Spread-F* (ESF)). Este fenômeno, o qual pode ser observado por diversos instrumentos, tais como sondas digitais (ionossondas) e radares, é caracterizado por situações em que a camada mais alta da ionosfera (denominada camada F) apresenta irregularidades na densidade de elétrons com extensão de diferentes ordens de magnitude (variando de centenas de quilômetros a poucos centímetros) (RODRIGUES, 2003; BAGIYA et al., 2014).

Na região equatorial (por exemplo, na região brasileira), as irregularidades de camada F espalhada começam a se desenvolver após o pôr-do-sol como parte de processos de instabilidade Rayleigh-Taylor (RT) do plasma ionosférico que aparecem com o terminador do dia para a noite. Estes processos são caracterizados pela subida de plasma de menor densidade para as regiões mais altas da ionosfera onde o plasma é mais denso. Após a subida até altitudes mais elevadas da ionosfera, o plasma inicia um processo de decida na direção das linhas de campo magnético da Terra. Este aspecto (subida e posterior decida do plasma ionosférico) caracteriza o efeito fonte, conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 2. Destaca-se que o movimento de decida do plasma está associado principalmente à ação da gravidade e de gradientes de pressão (RODRIGUES, 2003; RICH et al., 2004; de PAULA et al., 2007).

Conforme destacado em Rodrigues (2003), demais características e aspectos teóricos que descrevem a dinâmica (surgimento e evolução) destas irregularidades no plasma ionosférico estão associadas à teoria do dínamo atmosférico. Tal teoria relaciona princípios que descrevem o movimento de gases neutros na atmosfera através das linhas de campo magnético terrestre e suas respectivas derivas eletromagnéticas ($E \times B$). Em síntese, observa-se que após o pôr-do-sol, ocorre um aumento na deriva vertical $E \times B$ do plasma ionosférico, evento também denominado pico de pré-reversão da deriva vertical do plasma. Posteriormente, este aumento leva à formação de estruturas de depleções do plasma (também denominadas bolhas ionosféricas) que podem se estender até regiões de baixas latitudes.

Como as bolhas tendem a evoluir na direção das linhas do campo magnético da Terra, as mesmas podem apresentar a forma aparente de um tubo alongado que pode se estender até as regiões da anomalia equatorial, compreendida aproximadamente 20° ao Norte e ao Sul do Equador Magnético (RODRIGUES, 2003; RICH et al., 2004; STEENBURGH; SMITHTRO; GROVES, 2008; SHUME et al., 2013; MORAES et al.,

¹ Nesta tese, as regiões equatoriais são referidas em relação ao equador magnético (também denominado *dip equator* na literatura em inglês). O equador magnético é caracterizado pelas regiões em que a inclinação do campo magnético terrestre é nula, ou seja, regiões em que as linhas de campo magnético são paralelas à superfície terrestre (BEACH, 1998). Na literatura, por vezes, comparece também o termo equador geomagnético (bem como latitude/longitude geomagnética). Nesta tese, adotou-se a terminologia de equador/latitude/longitude magnético(a) ou de “dip”, conforme sugerido em Laundal e Richmond (2017).

2017).

No contexto do tempo, de Paula et al. (2007) (e referências destacadas) exemplificam que o período decorrido para que a bolha (gerada na região do equador magnético) evolua até atingir a região de São José dos Campos, no pico da anomalia equatorial, é de cerca de 1 hora e 30 minutos. Ademais, como estes eventos ocorrem após o pôr-do-sol, tem-se que a dinâmica evolutiva das irregularidades predomine aproximadamente na faixa de horário entre 18:00 e 24:00 (no tempo local).

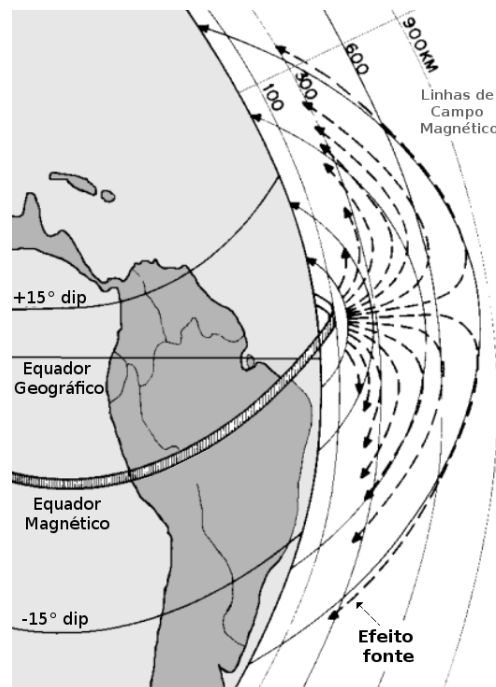


Figura 2 – Representação gráfica da dinâmica da ionosfera na região equatorial: em cinza claro são representadas as linhas de campo magnético da Terra em diferentes altitudes (100, 300, 600 e 900 km); as linhas pontilhadas em preto representam as direções da evolução das irregularidades no plasma ionosférico após o pôr-do-sol, caracterizando o efeito fonte. Fonte: adaptado de Rich et al. (2004).

Uma das maneiras de se observar e monitorar a ocorrência de cintilação ionosférica (bem como contextualizar sua ocorrência com aspectos teóricos que descrevem as irregularidades na ionosfera) é por meio da utilização de receptores GNSS com recursos específicos de monitoramento (ISMRS), os quais permitem estimar os principais índices de cintilação.

Na subseção 2.2.1, são apresentados aspectos do monitoramento de cintilação por GNSS. Uma descrição da rede CIGALA/CALIBRA é apresentada. Esta rede vem sendo gerenciada pela FCT/UNESP (com o apoio de parceiros) desde 2011 e continua em operação atualmente. São apresentados os principais índices que descrevem as cintilações no contexto do GNSS e como eles podem ser calculados a partir de dados provenientes de receptores tais como os utilizados na rede CIGALA/CALIBRA.

Na seção 2.3, aspectos que descrevem a climatologia das cintilações são apresentados sob a perspectiva do monitoramento da rede CIGALA/CALIBRA.

Na seção 2.4, são apresentados aspectos acerca da direção de propagação dos sinais GNSS em alinhamento com a direção de propagação das irregularidades que causam as cintilações (linhas de campo magnético terrestre). São apresentadas métricas definidas recentemente na literatura para caracterizar as cintilações associadas à esta geometria de propagação.

2.2.1 Monitoramento por GNSS e Principais Índices

Uma rede de monitoramento de cintilação ionosférica para o território brasileiro iniciou sua operação em 2011, sendo gerenciada na FCT/UNESP com o apoio de parceiros. A rede foi constituída pela integração dos projetos CIGALA, CALIBRA e Projeto GNSS-SP, sendo denominada atualmente “Rede CIGALA/CALIBRA”. O projeto CIGALA, cujo nome é derivado de *Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*, foi concluído em fevereiro de 2012, e teve a duração de dois anos. Tal projeto visou desenvolver e testar abordagens para mitigação da cintilação ionosférica para serem implementadas em receptores GNSS. Foi formada uma equipe com diversas instituições da Europa e do Brasil, dentre as quais esteve inserida a FCT/UNESP e a fabricante de receptores Septentrio. No contexto do projeto CIGALA, teve início a implantação da rede de monitoramento, cujas primeiras estações foram estabelecidas em Março de 2011 em Presidente Prudente/SP, nas dependências da FCT/UNESP. Dando continuidade ao projeto CIGALA, o projeto CALIBRA, cujo nome é derivado de *Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL*, envolveu também a cooperação de diversas instituições da Europa e do Brasil, incluindo a FCT/UNESP. Tal Projeto teve início em Novembro de 2012 e teve a duração aproximada de dois anos. O Projeto CALIBRA teve por objetivos principais o desenvolvimento de novas técnicas para mitigação dos efeitos da cintilação ionosférica. Dentre as suas atividades, destacou-se a expansão da rede de monitoramento com a instalação de mais três estações de monitoramento. Por fim, o Projeto GNSS-SP (GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão – Processo FAPESP 06/04008-2), que teve duração de mais de quatro anos e propiciou a aquisição de quatro receptores de monitoramento de cintilação.

Ao término destes projetos, a rede de monitoramento CIGALA/CALIBRA contava com um total de 12 estações de monitoramento contínuo disponíveis nas cinco regiões do Brasil, conforme apresentado na Figura 3. Todas as estações de monitoramento possuem receptores GNSS Septentrio PolaRxS-PRO, os quais coletam dados com alta taxa de amostragem (50 Hz até 100 Hz) e calculam parâmetros específicos da ionosfera a cada minuto.

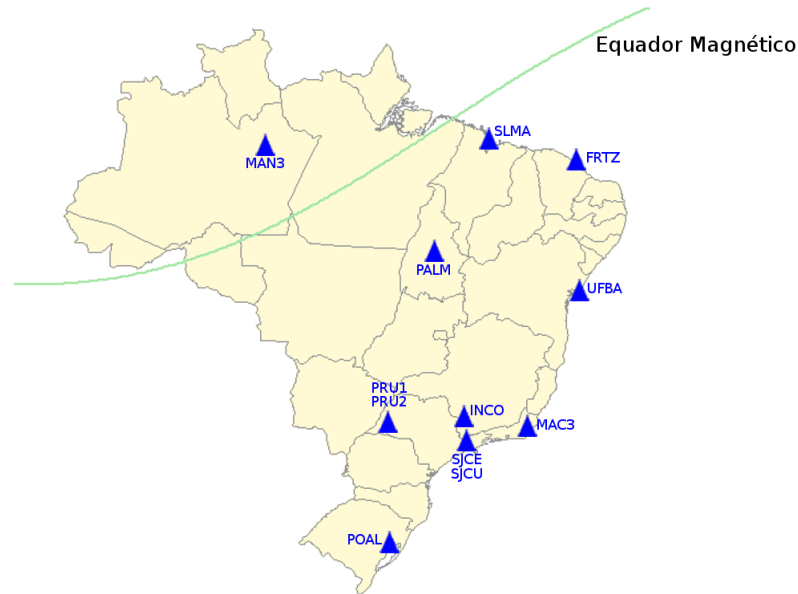


Figura 3 – Distribuição das estações da Rede CIGALA/CALIBRA.

O Quadro 2.1 apresenta os principais tipos de dados registrados pelos receptores da rede CIGALA/CALIBRA e que foram utilizados neste projeto. Em resumo, tem-se os dados de intensidade e fase em alta taxa de amostragem (50 Hz), também denominados dados brutos, os dados de observação (arquivos RINEX com taxas de observação a partir de 1 Hz) e os dados ISMR (estimados a cada 60 segundos). Ressalta-se que os dados brutos estão disponíveis apenas para os códigos civis dos sistemas GNSS, disponibilizados livremente ao público. Exemplificando-se para o GPS, os dados 50 Hz estão disponíveis para os códigos L1(C/A – *coarse/acquisition*), L2C e L5. Para os códigos protegidos, como o código L2/P(Y), não há dados 50 Hz disponíveis.

Tipo de Dado	Taxa de Amostragem	Descrição
Bruto	50 Hz	Dados de intensidade e de fase (apenas para códigos civis)
RINEX	1 Hz	Observáveis GNSS (pseudodistância, fase, razão sinal-ruído, doppler) para códigos civis ou protegidos
ISMR	A cada 60 segundos	Principais índices de cintilação, TEC e variações, informações adicionais (azimute, elevação, etc.)

Quadro 2.1 – Diferentes tipos de dados e principais características.

O principal índice utilizado para descrever as cintilações de amplitude é o índice S4 – uma medida da severidade das flutuações de amplitude do sinal (DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993). O índice S4 pode ser obtido a partir de observações da intensidade do sinal em altas taxas de amostragem de acordo com a Equação 2.5:

$$S4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5, tem-se que:

- I é a intensidade do sinal amostrada a uma alta taxa (por exemplo, 50 Hz);
- $S4$ é o índice “S4 total”, o qual inclui as flutuações de amplitude de qualquer causa, ou seja, pode incluir possíveis ruídos locais de ambiente e/ou efeitos de multicaminho;
- o operador $\langle x \rangle$ indica o valor esperado (ou a média) para x ; nos dados ISMR, a média é calculada no intervalo de um minuto.

Observa-se que a Equação 2.5 representa o desvio-padrão da intensidade do sinal normalizada pela sua média. Uma outra forma de reescrevê-la é a apresentada na Equação 2.6:

$$S4 = \frac{\text{desvio-padrão}(I)}{\text{média}(I)} \quad (2.6)$$

A sequência a seguir detalha algumas etapas do cálculo do índice $S4$ para o receptor PolaRxS PRO, da Septentrio. Foram utilizados dados da estação PRU2 coletados no dia 03/11/2014 no período de um minuto (entre 20:22:00 e 20:23:00 no tempo local). O receptor coleta os dados a uma taxa de 50 Hz, ou seja, são realizadas 50 observações por segundo. Todas as informações coletadas são gravadas em um arquivo bruto. Observações de interesse podem ser extraídas posteriormente utilizando-se o software utilitário do fabricante denominado *sb2ismr*, o qual permite extrair as observações coletadas a 50 Hz ou obter um arquivo no formato “.ismr” contendo, dentre outros parâmetros, o índice $S4$ já calculado a cada minuto.

O Quadro 2.2 representa o subconjunto de dados de observação coletados a 50 Hz. São exibidos dados apenas do satélite GPS identificado pelo número do código pseudoaleatório (*pseudorandom noise* – PRN) n° 12, coletados na frequência L1 no mencionado intervalo. Observa-se que são 3000 amostras (uma a cada 0,02 segundos). Para cada instante de observação, o receptor registra o tempo – expresso em TOW (*time of week* – segundos da semana GPS) –, um identificador para o satélite (*space vehicle identifier* (SVID), que corresponde ao PRN dos satélites, para o caso do GPS), um identificador (*flag*) para o sinal rastreado (no exemplo, o identificador 0 corresponde ao código C/A na frequência L1 do GPS), a fase do sinal (em ciclos), e dois componentes de quadratura

do sinal, aqui denominados² I_{corr} e Q_{corr} (SEPTENTRIO SATELLITE NAVIGATION, 2015).

#	TOW	SVID	Flag	Fase (ciclos)	Icorr	Qcorr
1	170520.00	12	0	110111704.048	556	-9
2	170520.02	12	0	110111719.345	559	-6
3	170520.04	12	0	110111734.642	576	-9
4	170520.06	12	0	110111749.939	572	-3
5	170520.08	12	0	110111765.235	574	5
6	170520.10	12	0	110111780.53	-573	-23
7	170520.12	12	0	110111795.825	600	9
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
2998	170579.94	12	0	110158402.48	491	29
2999	170579.96	12	0	110158418.351	-484	6
3000	170579.98	12	0	110158434.223	-494	-9

Quadro 2.2 – Subconjunto extraído de arquivo bruto coletado a 50 Hz pelo receptor Septentrio PolaRxS PRO. Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.

Os componentes de quadratura do sinal são obtidos pela correlação entre o sinal recebido na antena do receptor e uma réplica interna gerada pelo receptor. Uma representação gráfica destes componentes é apresentada na Figura 4, na qual o sinal recebido em um instante t é representado em um plano cartesiano no qual os eixos descrevem os componentes de fase e de quadratura do mesmo; a amplitude r do sinal também é representada.

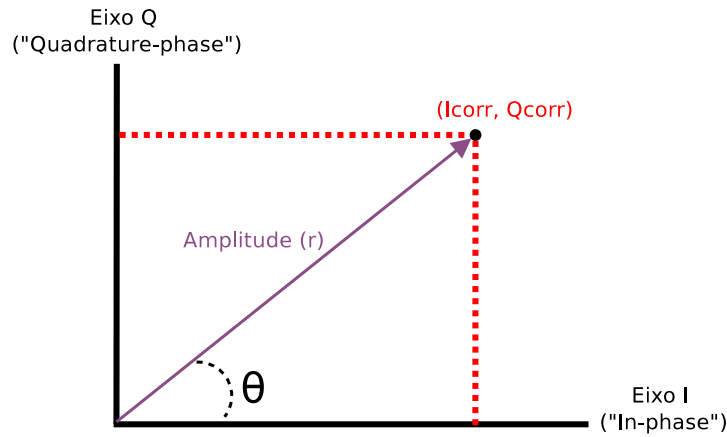


Figura 4 – Representação gráfica dos componentes do sinal em uma época t representados sobre um plano cartesiano.

Conforme esquema apresentado na Figura 4, as seguintes relações podem ser descritas:

² Na literatura, comparece também a denominação de componentes “ I/Q ”, referindo-se a componentes “in-phase” e “quadrature-phase”. Nesta tese, utilizou-se a denominação I_{corr} e Q_{corr} , uma vez que a letra “ I ” também é comumente utilizada para designar a intensidade do sinal.

$$I_{corr} = r(t) \cos(\Theta) \quad (2.7)$$

$$Q_{corr} = r(t) \sin(\Theta) \quad (2.8)$$

E, pela aplicação do Teorema de Pitágoras, obtém-se a amplitude r do sinal:

$$r = \sqrt{I_{corr}^2 + Q_{corr}^2} \quad (2.9)$$

De maneira similar, uma vez obtidos I_{corr} e Q_{corr} em cada época, pode-se então calcular a intensidade do sinal I , a qual corresponde à potência do sinal recebido em cada instante de observação (YACOUN, 1993):

$$I = I_{corr}^2 + Q_{corr}^2 \quad (2.10)$$

Observa-se que $I = r^2$.

Uma normalização sobre os valores de intensidade I pode ser aplicada para obter valores em uma escala mais adequada para avaliar suas variações e realizar comparações numéricas. Um exemplo de normalização consiste na divisão de cada valor de intensidade I (Equação 2.10, obtidos ao longo de um minuto) pela média de I no referido minuto:

$$\text{Normalização}(I) = \frac{I}{\langle I \rangle} \quad (2.11)$$

A Figura 5 apresenta um exemplo de intensidade normalizada do sinal (Equação 2.11) obtida no minuto representado no Quadro 2.2. Por convenção, é comum apresentar a intensidade em escala logarítmica e em unidades de decibéis (dB). Observa-se que a variabilidade no valor da intensidade normalizada indica a incidência de cintilação sobre o sinal no referido minuto. É possível observar desvanecimentos (também denominados atenuações ou *fadings*) severos na intensidade, os quais chegaram a quase -40 dB. Como resultado da aplicação da Equação 2.5, obteve-se o valor $S4 = 0,818$ no referido minuto.

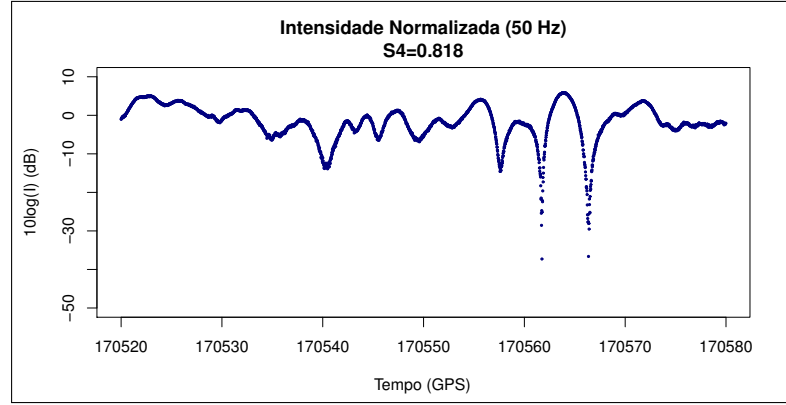


Figura 5 – Intensidade I (normalizada pela média) de um sinal sob efeito de cintilação observada no período de um minuto (amostrada a 50 Hz). Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.

Um processo de detecção de ruídos locais pode ainda ser empregado para a obtenção do índice S4 corrigido ($S4_c$). Este processo visa remover a influência de ruídos de ambiente no valor do S4 total, por exemplo, a influência da temperatura física do receptor. Se aplicado, para o caso do receptor Septentrio PolaRxS PRO, tem-se que (SEPTENTRIO SATELLITE NAVIGATION, 2015):

$$S4_c = \begin{cases} \sqrt{S4_T^2 - S4_N^2}, & \text{se } S4_T^2 - S4_N^2 > 0 \\ 0, & \text{se } S4_T^2 - S4_N^2 \leq 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

Na Equação 2.12, $S4_N$ é a proporção de índice S4 devido a ruídos de ambiente. O processo de detecção de ruídos locais pode variar de receptor para receptor; uma metodologia para esta estimativa pode ser encontrada em Dierendonck, Klobuchar e Hua (1993). Em síntese, uma estimativa do S4 devido a ruídos é obtida pela média da densidade sinal-ruído ao longo do intervalo de um minuto. Esta estimativa pode ser realizada considerando um canal desocupado do receptor, visando absorver apenas os ruídos de ambiente. Este valor pode ser então retirado de S4 conforme apresentado na Equação 2.12. Como resultado da remoção de ruídos, tem-se que a estimativa do $S4_c$ é inferior ao S4 total. Neste trabalho, optou-se pela utilização do índice S4 total, uma vez que tem-se o interesse de investigar as características do sinal recebido sem descartar quaisquer influências sobre o índice S4.

Destaca-se também que os efeitos de multicaminho podem causar aumento na estimativa do S4, sendo conveniente a utilização de alguma abordagem para o controle deste efeito, por exemplo, a realização de uma filtragem ou aplicação de máscara de elevação para satélites mais baixos (exclusão de observações inferiores a certo ângulo de elevação, como 20°) (DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993; DATTA-BARUA et al., 2003; BRASSAROTE; SOUZA; MONICO, 2018). Na implantação de estações de monitoramento

de cintilação por GNSS, busca-se obter um ambiente ideal para o monitoramento, longes de obstáculos como prédios ou árvores e livres de superfícies refletoras abaixo da antena.

O índice S4 é adimensional, e seu limite inferior 0 indica ausência de cintilação. A normalização pela média aplicada sobre a intensidade do sinal no cálculo do índice S4 (Equação 2.6) leva à condição $E\{I\} = 1$, ou seja, ao realizar a normalização da intensidade pela sua média no período de um minuto, tem-se que a média da intensidade normalizada neste minuto é igual a 1. Observa-se que esta normalização não limita o valor superior do índice S4, o que pode acarretar em valores de S4 superiores a 1. No entanto, conforme será visto adiante, desvanecimentos severos na intensidade do sinal podem causar perdas de sincronismo, fazendo com que ocorra a interrupção total do rastreamento do satélite, o que limita valores muito altos de S4. Logo, o valor superior do índice S4 varia de acordo com relação entre a severidade dos desvanecimentos observados ao longo intervalo de observação e a manutenção do sincronismo. É comum adotar rótulos classificadores para a severidade das cintilações de acordo com o valor do índice S4. Em International Telecommunication Union (2012), a seguinte classificação é apresentada:

- Cintilação fraca: $S4 < 0,3$;
- Cintilação moderada: $0,3 \leq S4 \leq 0,6$;
- Cintilação forte: $S4 > 0,6$.

Outras classificações (ou rótulos) para o nível de cintilação de acordo com o valor do índice S4 podem ser encontradas na literatura, tais como em Tiwari et al. (2011) e Hegarty et al. (2001).

Enquanto o índice S4 quantifica as cintilações de amplitude, outro índice é utilizado para caracterizar as cintilações de fase – o Sigma-phi. Tal índice consiste no desvio-padrão da fase filtrada do sinal. A fase é filtrada para remoção de tendências e identificação da ocorrência de cintilações (na literatura, comparece o termo *detrended phase*). Tipicamente, o processo de filtragem da fase consiste na aplicação de um filtro Butterworth de 6ª ordem, aplicando-se uma frequência de corte de 0,1 Hz (DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993). Desta forma, elimina-se o efeito da geometria orbital do satélite e do erro do relógio do receptor ao longo do tempo.

A Figura 6 apresenta um exemplo de estimativa do Sigma-phi para o mesmo período de um minuto apresentado na demonstração do cálculo do índice S4 (Figura 5). Na Fig. 6a, a fase do sinal (em ciclos) amostrada a 50 Hz é apresentada – trata-se da mesma observável que é apresentada no arquivo RINEX de observação ($\phi_{L1(C/A)}$). Observa-se que é difícil detectar flutuações na fase por esta representação, sendo possível notar apenas a mudança de geometria satélite-receptor ao longo do tempo (pelo aumento do número de

ciclos). Na Fig. 6b, a tripla-diferença³ da fase em relação ao tempo é apresentada. Esta representação pode ser adotada pra remover o efeito da geometria do satélite e do relógio do receptor, permitindo representar a variabilidade da fase. Observa-se que é possível notar flutuações, indicando a ocorrência de cintilações de fase. Por fim, na Fig. 6c, a fase filtrada do sinal (pelo filtro Butterworth de 6ª ordem) é apresentada; sobre esta saída é calculado o desvio-padrão e obtido o valor do índice Sigma-phi para o minuto. Nesta representação, também é possível notar a presença de cintilações (valor estimado de Sigma-phi=0,49 rad ou 0,08 ciclos). Observa-se também que as flutuações mais severas na fase ocorreram simultaneamente aos desvanecimentos severos na intensidade, conforme foi apresentado na Figura 5. Este aspecto será discutido adiante, no Capítulo 3.

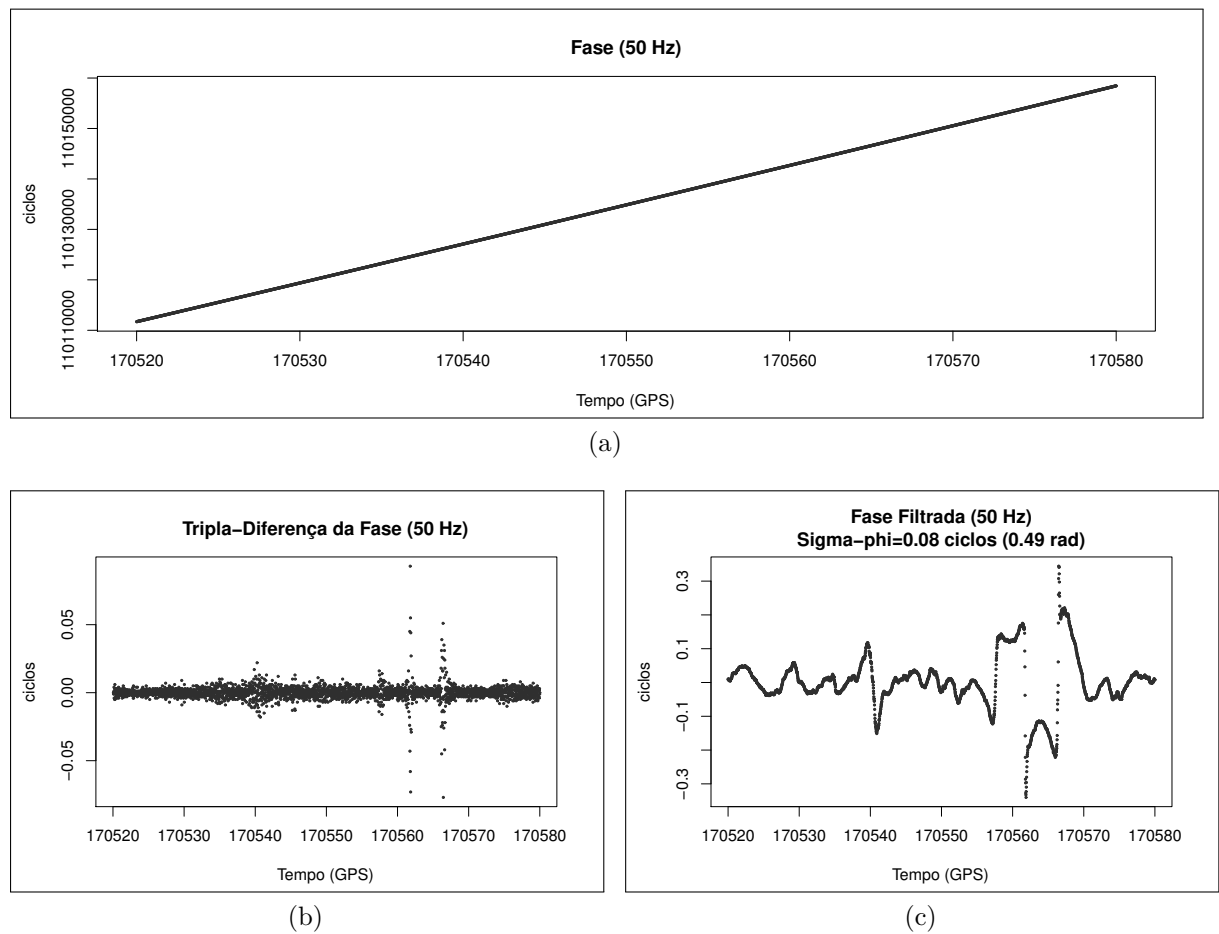


Figura 6 – Dados de fase de um sinal sob efeito de cintilação observada no período de um minuto: (a) fase original; (b) tripla-diferença da fase em relação ao tempo; (c) fase filtrada pelo Butterworth de 6ª ordem. Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.

Devido ao processo de filtragem da fase, o índice Sigma-phi é sensível a perdas

³ Simples-diferenças são obtidas pela diferença entre duas observações consecutivas de fase ($\phi_{(t2)} - \phi_{(t1)}$), do mesmo satélite, observadas nas épocas $t1$ e $t2$, respectivamente. De maneira similar, as duplas-diferenças são obtidas pela diferença entre duas simples-diferenças consecutivas. E triplas-diferenças são obtidas pela diferença entre duas duplas-diferenças consecutivas (LOGSDON, 1992; HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

de sincronismo. Este aspecto se deve ao efeito de borda causado pela aplicação do filtro Butterworth, o qual requer o acúmulo de observações ao longo de janelas de tempo. Considerando os dados coletados a uma taxa de 50 Hz, o tempo requerido para eliminar o efeito de borda do filtro pode chegar a aproximadamente 4 minutos. Se o rastreamento segue sem interrupção, não há prejuízo na estimativa do Sigma-phi. No entanto, se ocorrerem perdas de sincronismo satélite-receptor, a disponibilidade do índice Sigma-phi é afetada e o índice não pode ser calculado.

A escala do Sigma-phi varia aproximadamente entre 0 e 1 (radianos). De maneira similar ao índice S4, algumas classificações para o nível de cintilação de acordo com o valor do Sigma-phi são encontradas na literatura, tais como em Tiwari et al. (2011) e Hegarty et al. (2001).

Tanto o S4, quanto o Sigma-phi são analisados, na maioria das vezes, nas frequências primárias dos GNSS (por exemplo, na frequência L1 para o caso do GPS). Contudo, os mesmos também podem ser observados nas outras frequências disponíveis em cada sistema de navegação. Algumas funções descritas na literatura permitem mapear os índices S4 e Sigma-phi da frequência L1 para obter um valor esperado nas frequências L2 e L5, como as definidas em Hegarty et al. (2001) e Peng et al. (2011). No entanto, as flutuações em cada sinal apresentam comportamentos distintos (JIAO et al., 2016; MORAES et al., 2017). A Figura 7 apresenta um exemplo comparativo entre a intensidade do sinal sob cintilação observada simultaneamente em diferentes frequências utilizadas pelo GPS (L1, L2 e L5). Os dados foram coletados pela estação SJCU, no dia 11/11/2014, entre 19:50 e 19:51 no tempo local (LT). Observa-se os diferentes padrões de desvanecimentos ao longo do minuto, os quais resultaram em diferentes valores de índice S4 obtido em cada frequência. Observa-se ainda que os padrões de desvanecimentos (e, conseqüentemente, os valores de índice S4) são mais similares entre si nas frequências L2 e L5 devido ao comprimento similar da 1ª zona de Fresnel nestas frequências. Destaca-se também que os caminhos de propagação são distintos entre os sinais nas diferentes portadoras.

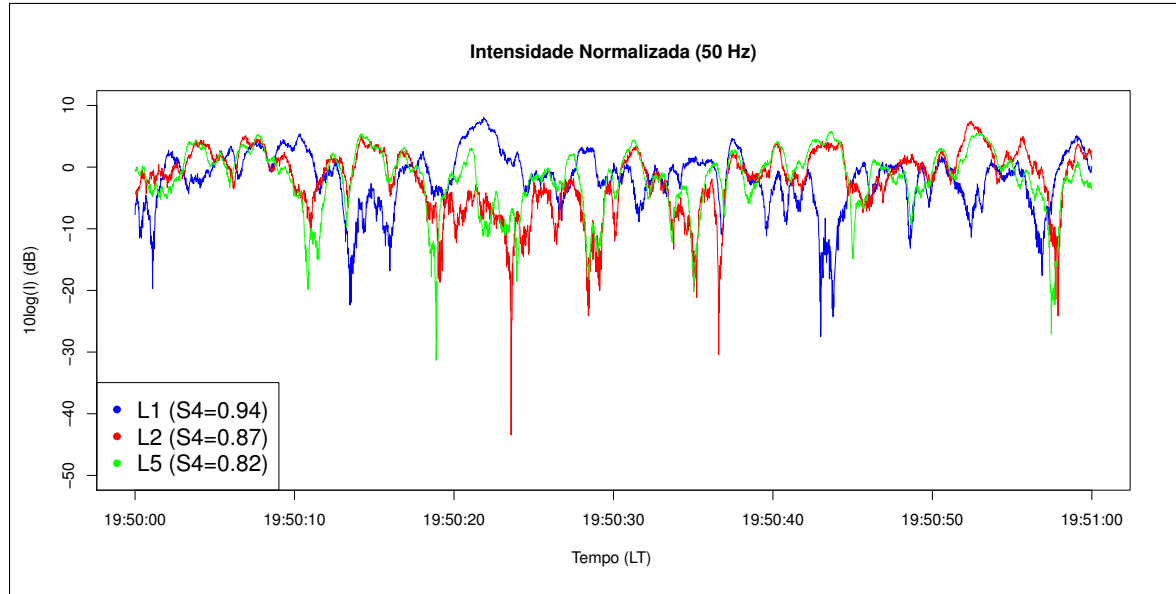


Figura 7 – Intensidade de um sinal sob efeito de cintilação observada simultaneamente em diferentes bandas. Dados da estação SJCUI para o satélite GPS 24, observados no dia 11/11/2014 entre 19:50 e 19:51 (LT).

Outros indicadores são comumente utilizados na descrição de sinais GNSS sob influência de cintilação. Dentre estes, destacam-se os parâmetros espectrais e a razão sinal-ruído.

Dois parâmetros espectrais são comumente utilizados como descritores para a cintilação de fase. O parâmetro p , denominado declive espectral (*spectral slope*), é definido à partir da análise da densidade espectral (Power Spectral Density – PSD) da fase filtrada do sinal. Exemplificando para o caso de dados da fase filtrada a 50 Hz (mesmos dados apresentados na Fig. 6c), tem-se 3000 amostras de fase filtrada no período de um minuto. Sobre este conjunto de dados, pode-se aplicar a transformada de Fourier para obter a respectiva PSD. O parâmetro p pode ser então calculado ao ajustar uma reta aos valores de PSD (em escala logarítmica “log-log”) no intervalo de frequências de 0,1 a 25 Hz. Um exemplo é apresentado na Figura 8, no qual a reta ajustada sobre a PSD (da forma $y = ax + b$) tem coeficiente angular $a = -2,90$ e intercepto $b = -2,112$. Logo, tem-se que o valor de $p = 2,90$ (valor oposto ao coeficiente angular). Já o parâmetro T , comumente denominado força espectral (*spectral strenght*), pode ser determinado pelo valor da reta ajustada em 1 Hz, o que corresponde ao valor do intercepto do ajuste linear (SEPTENTRIO SATELLITE NAVIGATION, 2015). Convencionalmente, pode-se expressar T em unidades de rad^2/Hz , obtendo-se, para este exemplo, o valor $T = 10^{-2,112} = 0,007 \text{ rad}^2/\text{Hz}$. Por serem todos derivados da fase filtrada do sinal a 50 Hz, é possível estabelecer relações matemáticas entre os valores de p , T e do índice Sigma-phi, conforme destacado em Strangeways et al. (2011).

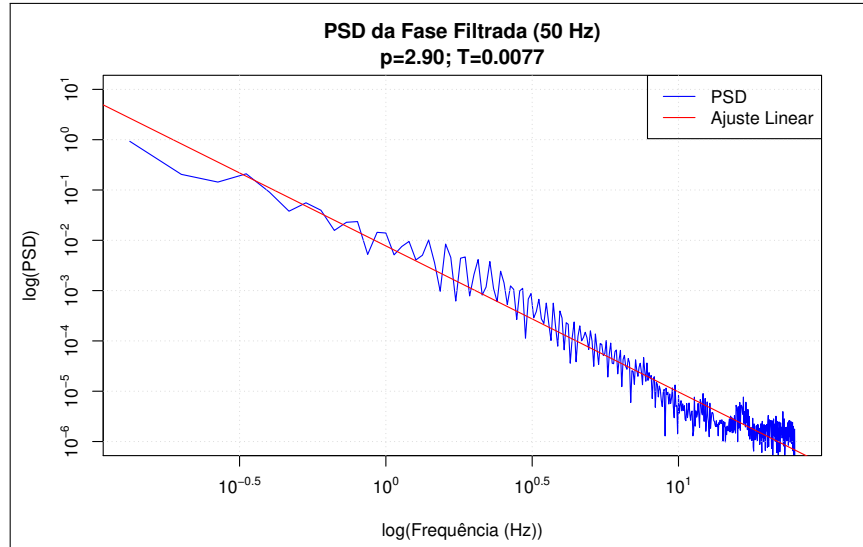


Figura 8 – PSD da fase filtrada do sinal em um período de 1 minuto para estimativa dos parâmetros espectrais p e T . Dados da estação PRU2 para o satélite GPS 12, observados no dia 03/11/2014.

A razão sinal-ruído (também denominada (*Signal-to-noise ratio* (SNR) ou *Carrier-to-noise ratio* (C/N_0) na literatura) figura como uma das observáveis GNSS e proporciona uma medida de qualidade do sinal recebido. A medida de SNR é definida pela razão entre a potência do sinal e a potência de ruído do sinal. Observa-se que a medida de SNR deve ser calculada ao longo do tempo, já que ambas as potências podem variar de acordo com o comportamento do meio. Os sinais provenientes de satélites GNSS se propagam pela atmosfera terrestre até chegaram aos receptores terrestres, estando suscetíveis a diversos fatores que acarretam em um sinal recebido que difere do sinal transmitido. Forouzan (2006) destaca três fatores que causam prejuízo à transmissão de sinais, independentemente do meio utilizado: atenuação, distorção e ruído. A atenuação do sinal refere-se à perda de energia: ao se propagar por um meio, um sinal perde energia devido à resistência deste meio. Por esta razão, em muitos casos, recorre-se a um amplificador de sinal, o qual amplifica um sinal atenuado visando compensar esta perda. Usualmente, utiliza-se a grandeza de decibéis (dB) para medir a atenuação ou amplificação da potência de um sinal. Desta forma, pode-se medir a potência relativa de dois sinais (ou a potência relativa de um mesmo sinal em épocas diferentes). A distorção do sinal refere-se a alterações em sua forma, normalmente ocasionadas por sinais compostos de diferentes frequências. Já o ruído pode ser classificado em diversos tipos. Destaca-se o ruído térmico, caracterizado pelo movimento aleatório de elétrons em um meio, o qual pode descaracterizar o sinal transmitido.

Variações na razão sinal-ruído podem indicar a ocorrência de cintilações. No entanto, a análise da intensidade do sinal (ou potência) normalizada é um indicador mais indicado para análise das cintilações do que a razão sinal-ruído, uma vez que é comum a utilização

de suavizações por janelas de média móvel em algoritmos para o cálculo da referida razão, os quais podem descaracterizar os desvanecimentos na intensidade (JIAO et al., 2016).

Ressalta-se também que, além do S4 e Sigma-phi (medidas diretas que caracterizam as cintilações de amplitude e fase, respectivamente), algumas medidas indiretas podem caracterizar a presença de cintilação sobre os sinais GNSS. Um exemplo são as medidas de variações no TEC, as quais podem ser consideradas ao longo do tempo e do espaço (PEREIRA; CAMARGO, 2017). Para o caso do receptor Septentrio PolaRxS PRO, destacam-se as medidas de diferença de TEC (dTEC). Os valores de dTEC caracterizam a variação do TEC em intervalos de 15 segundos durante um minuto, os quais são baseados em observáveis de fase da onda portadora. Variações nos valores de dTEC podem ser utilizadas para caracterizar indiretamente a ocorrência de cintilações. Outros indicadores também podem ser utilizados para esta finalidade, tais como estatísticas sobre a razão sinal-ruído, indicadores de tempo de sincronismo satélite-receptor e estatísticas de divergência entre valores de pseudodistância e fase. Todos estes indicadores estão disponíveis em um arquivo “ismr” padrão com taxas de amostragem de 60 segundos para o caso do receptor PolaRxS PRO.

2.3 Aspectos da climatologia da cintilação sob a perspectiva do monitoramento pela Rede CIGALA/CALIBRA

Considerando a climatologia das cintilações em regiões equatoriais e especificamente na região brasileira, diversos trabalhos são destacados na literatura, tais como Basu, MacKenzie e Basu (1988), de Paula et al. (2003), Rezende et al. (2007), Spogli et al. (2013), Muella, de Paula e Monteiro (2013), Muella et al. (2017), Moraes et al. (2017), Moraes et al. (2018), dentre outros. Nesta seção, os principais aspectos relacionados a esta climatologia são apresentados por meio de exemplos característicos derivados a partir de dados da rede de monitoramento CIGALA/CALIBRA. É consenso na literatura que a frequência de ocorrência de cintilações e a severidade das mesmas variam principalmente conforme o ciclo de atividade solar – apresentando também variações sazonais (subseção 2.3.1); variações de acordo com o horário local (subseção 2.3.2); variações de acordo com a localização geográfica (subseção 2.3.3) e variações de acordo com a atividade magnética (subseção 2.3.4).

2.3.1 Influência dos Ciclos de Atividade Solar e Variações Sazonais

A principal influência das interações entre íons e elétrons na ionosfera está relacionada à atividade do sol, que libera partículas pelo espaço interplanetário. Historicamente, em estudos específicos de observação do sol, pôde-se notar a presença de manchas escuras, as quais são denominadas *sunspots*. A observação destas manchas pode ser utilizada para

análise dos efeitos do sol na ionosfera. Como exemplo, pode-se mencionar os estudos acerca da refração e da cintilação ionosféricas, e, conseqüentemente, os respectivos efeitos no posicionamento GNSS.

Por meio de observações das manchas solares, é possível observar um comportamento cíclico que se repete a cada 11 anos (aproximadamente), caracterizando-se os ciclos solares (McNAMARA, 1991; KIRCHHOFF, 1991). Logo, os efeitos causados pela ionosfera no posicionamento GNSS são mais intensos de acordo com a variação do ciclo solar.

Alguns centros, como a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), catalogam as manchas solares, inclusive disponibilizando previsões. A Figura 9a apresenta a progressão recente dos ciclos solares a partir do ano 2000, incluindo uma parte predita. Pode-se observar que, em 2018, o último ciclo solar (de número 24) está em seu declínio; pode-se inferir também que o ciclo solar 24 apresenta menos intensidade que o ciclo solar anterior (de número 23), conforme pode ser observado no pico do ciclo solar anterior aproximadamente entre os anos de 2000 e 2002.

Outro indicador do nível de atividade solar é o fluxo de emissão de rádio por parte do Sol, observado em um comprimento de onda de 10,7 cm (2,8 GHz). Tal fluxo vem sendo observado desde 1947 por centros especializados, caracterizando-se como um importante indicador da atividade solar denominado “F10.7”. Suas observações indicam que o mesmo segue comportamento muito próximo ao número de manchas solares, tendo a característica de ser tecnicamente mais fácil de observar (McNAMARA, 1991; NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2015). O F10.7 é apresentado na Figura 9b, compreendendo o mesmo intervalo apresentado na Fig. 9a; ele é representado em unidades de densidade de fluxo sfu (sendo que: $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$). Observa-se o comportamento similar entre o número de manchas solares e o F10.7.

Um exemplo adicional para descrever a atividade solar é apresentado na Figura 10, na qual os valores médios mensais do F10.7 no período compreendido entre fevereiro de 1947 até março de 2018 são apresentados. Os dados foram históricos foram obtidos junto à base de dados de Clima Espacial do *Natural Resources Canada* (NRCAN) (NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN) - SPACE WEATHER, 2018).

Em Muella et al. (2017), uma contextualização da ocorrência de cintilação e sua relação com valores médios mensais do F10.7 é apresentada. A análise é realizada com dados de índice S4 coletados em Cachoeira Paulista/SP no período de de 1997 a 2014, abrangendo, portanto, os ciclos solares de número 23 e 24. A representação gráfica é apresentada na Figura 11. É possível notar que a porcentagem de ocorrência de cintilação (representada em valores de porcentagem de $S4 > 0.5$ e $S4 > 0.2$) foi superior no ciclo solar n° 23 se comparada ao ciclo solar n° 24. A Figura 11 também permite identificar os horários mais afetados pela cintilação (compreendidos aproximadamente entre 23:00 e

04:00 no tempo universal (UT) ou entre 20:00 e 01:00 no tempo local (UT-3), aspecto que também será discutido adiante na subseção 2.3.2).

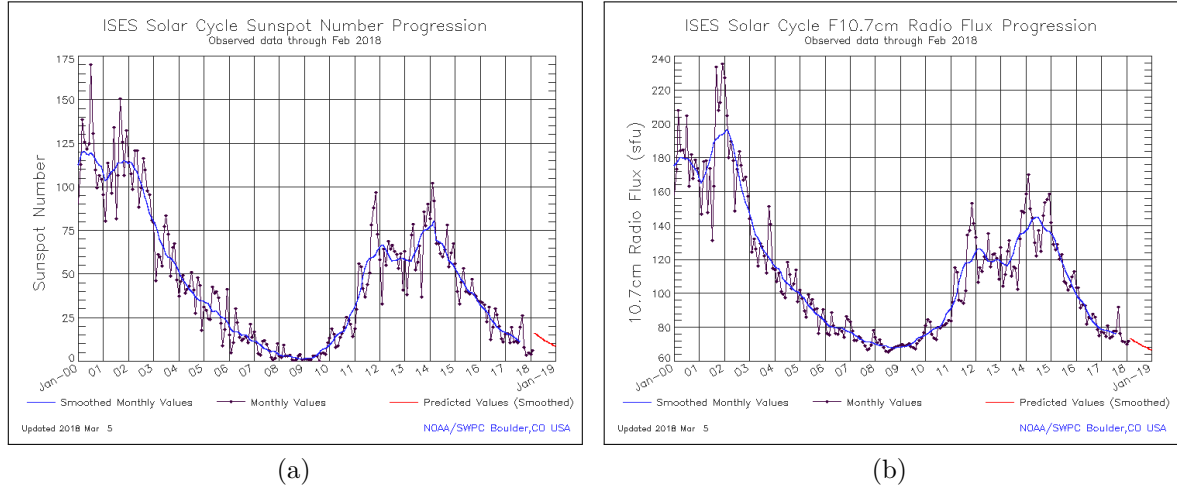


Figura 9 – Progressão dos ciclos solares a partir do ano 2000: (a) número de manchas solares; (b) Fluxo solar (F10.7). Fonte: (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) - SPACE WEATHER PREDICTION CENTER, 2018).

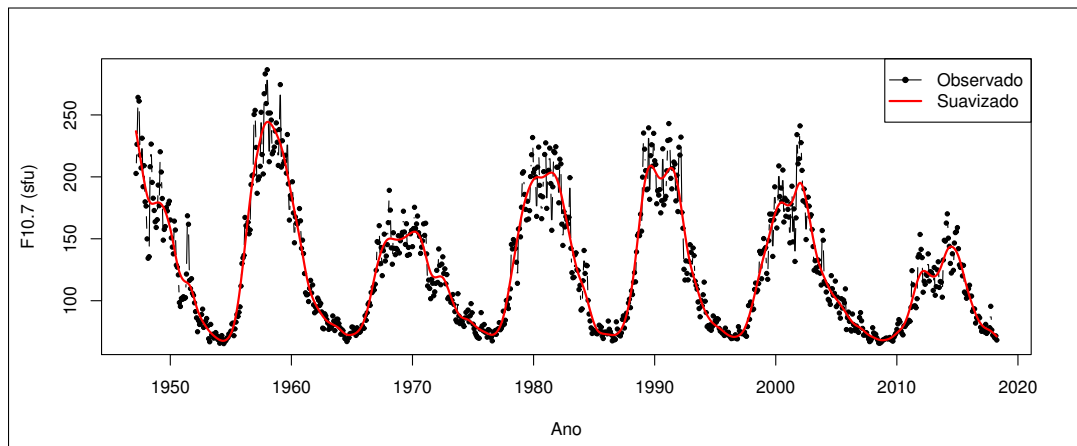


Figura 10 – Valores médios mensais do F10.7 observados no período entre fevereiro de 1947 a março de 2018. Dados obtidos na base de dados de Clima Espacial do NRCAN (NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN) - SPACE WEATHER, 2018).

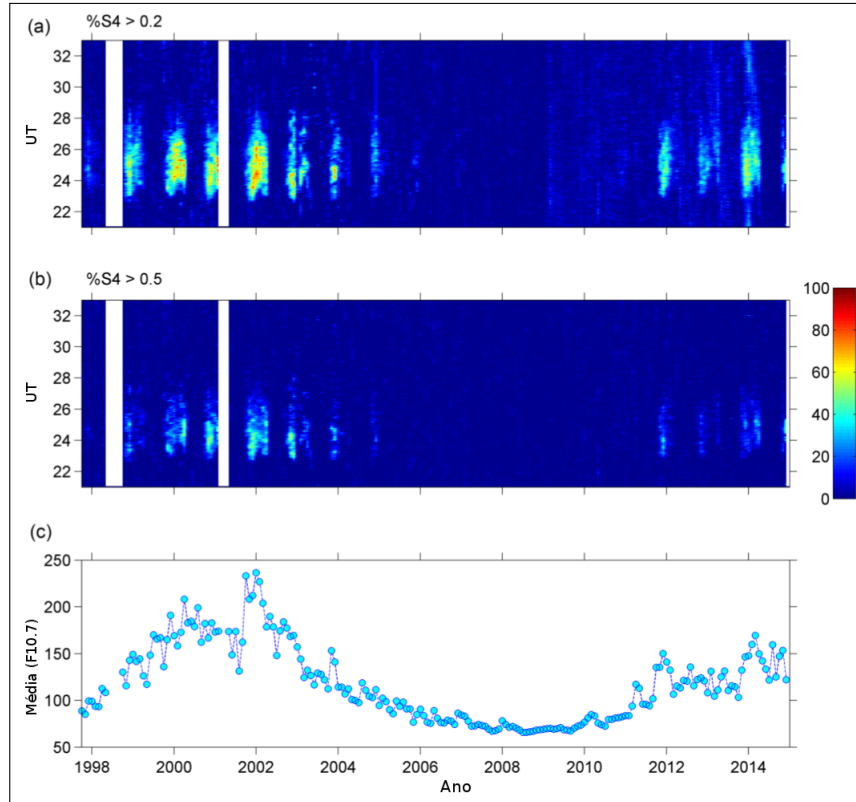


Figura 11 – Porcentagem de ocorrência de cintilação e índice F10.7: (a) Porcentagem de casos de $S4 > 0.5$; (b) porcentagem de ocorrência de casos de $S4 > 0.2$; (c) Valor médio do F10.7. Fonte: Adaptada de Muella et al. (2017).

Considerando o domínio temporal de dados da Rede CIGALA/CALIBRA (a partir de 2011), também é possível observar a relação da ocorrência de cintilações com a atividade solar (considerando o ciclo solar n° 24). Também é possível contextualizar este aspecto com as variações sazonais (de acordo com a época do ano). Na região equatorial (abrangendo, portanto, a região brasileira), é possível observar que as cintilações são mais comuns no período compreendido entre o equinócio de primavera (22 ou 23 de setembro) e o equinócio de outono (20 ou 21 de março) (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2012).

O aspecto da variação sazonal e a relação com o ciclo solar podem ser observados na análise multianual apresentada na Figura 12, na qual são apresentadas as estimativas médias diárias de cintilação (índice S4 obtidos de dados GPS com máscara de elevação de 10°) para a estação PRU2 da rede CIGALA/CALIBRA, obtidas com a utilização do software ISMR Query Tool. O nível de cintilação é representado pela intensidade das cores, e as células em cinza indicam indisponibilidade de dados. A variação sazonal pode ser inferida ano a ano desde 2012 (é possível notar os valores mais altos na média do índice S4 entre Setembro e Março); a ascensão, pico e declínio do ciclo solar 24 também podem ser inferidos pelo aspecto geral das visões de calendário a cada ano, as quais indicam valores

mais altos na média do índice S4 próximos ao período de pico do ciclo solar.



Figura 12 – Médias diárias do índice S4 para estação PRU2 no período de 2012 a 2016 (dados GPS com máscara de elevação de 10°). As células em cinza indicam indisponibilidade de dados.

2.3.2 Influência do Horário Local e Variabilidade Diária

Nas regiões equatoriais, condições locais da ionosfera levam à formação de estruturas de irregularidades na densidade de plasma ionosférico após o pôr-do-sol. Sinais de rádio que por ventura se propaguem por estas irregularidades podem sofrer as cintilações (ANDERSON et al., 2004). É possível observar que as cintilações apresentam, portanto, relação com o horário local: elas ocorrem tipicamente após o pôr-do-sol, e podem ter a duração de alguns minutos até algumas horas.

Nos períodos de alta atividade solar e compreendidos entre os equinócios de primavera e outono, conforme apresentado na subseção 2.3.1, estes eventos tendem a ocorrer diariamente. A Figura 13 apresenta o índice S4 obtido por todos os satélites GPS para a estação PRU2 (Presidente Prudente/SP) no período de uma semana (29/11/2014 a 06/12/2014). É possível observar os picos diários de alto índice S4, tipicamente compreen-

dados aproximadamente entre às 21:00 e 22:00 no tempo local (UT-3). Observa-se também a variabilidade nos valores obtidos a cada dia, com picos de S4 de magnitudes variadas, chegando a valores de S4 superiores a 1,4.

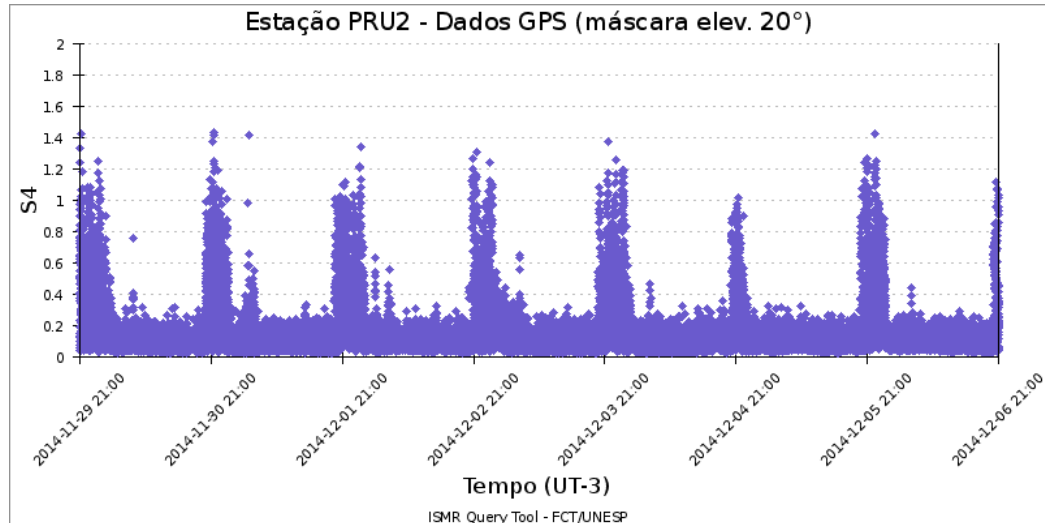


Figura 13 – Picos de alto índice S4 observados na estação PRU2 ao longo de uma semana.

2.3.3 Influência da Localização Geográfica

Considerando a influência da localização geográfica para a ocorrência de cintilações, uma descrição a nível global pode ser encontrada em Kintner Jr., Humphreys e Hinks (2009) (considerando também os cenários mais propícios à ocorrência de cintilação, apresentados nas subseções 2.3.1 e 2.3.2). Pode-se observar que as regiões mais afetadas pela cintilação aparecem na região equatorial (em relação ao equador magnético), nas regiões de baixas latitudes (compreendendo a região da anomalia de ionização equatorial) e nas regiões aurorais.

Considerando o domínio que abrange a região brasileira (regiões equatorial e de baixas latitudes), diversos estudos destacados na literatura evidenciam que a porcentagem de ocorrência de cintilação e a severidade das mesmas são mais significativas na região do pico da anomalia de ionização equatorial (aproximadamente 15° ao norte e ao sul do equador magnético) do que na região do equador magnético. Este aspecto se deve à maior densidade do plasma ionosférico nos picos da anomalia de ionização equatorial (BASU; MACKENZIE; BASU, 1988; de PAULA et al., 2003; WALTER et al., 2010; MORAES et al., 2017). Análises realizadas com os dados da rede CIGALA/CALIBRA caracterizam este aspecto. Um exemplo é apresentado na Figura 14, na qual um mapa do desvio-padrão do índice S4 observado pelas estações da rede no período de 22/09/2014 a 15/10/2014 é apresentado. Este período foi escolhido devido à alta disponibilidade de dados coletados simultaneamente nas diferentes estações, as quais são representadas por triângulos no

mapa. Utiliza-se o desvio-padrão para representar as regiões onde o índice S4 apresenta maior variabilidade, indicando, portanto, a ocorrência de cintilação. É possível observar a delimitação da faixa mais atingida pelas cintilações ao norte (com certa limitação devido a disponibilidade de dados em apenas uma estação em Manaus/AM) e ao sul do equador magnético.

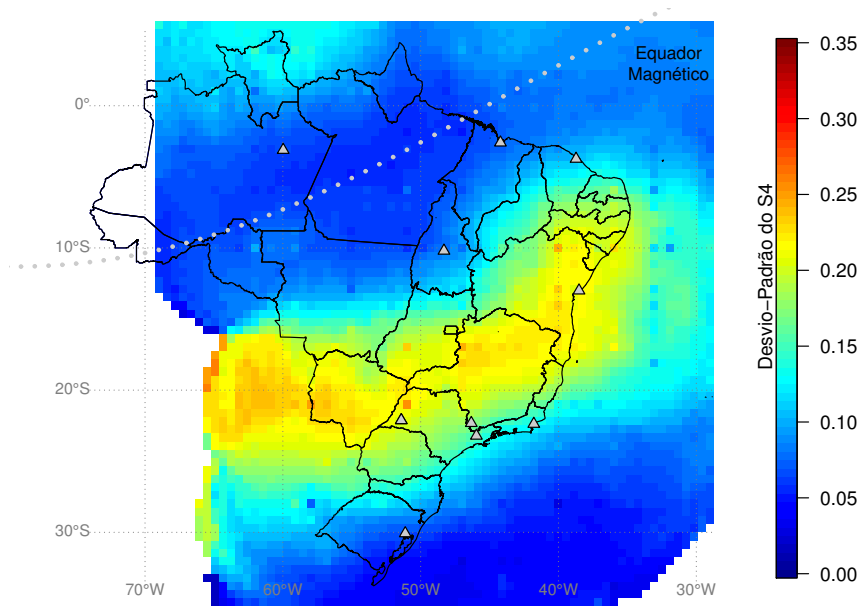


Figura 14 – Desvio-padrão do índice S4. Dados GPS, GLONASS e Galileo coletados por estações de monitoramento da Rede CIGALA/CALIBRA (máscara de elevação de 20°) no período de 22/09/2014 a 15/10/2014.

2.3.4 Influência da Atividade Magnética

As tempestades magnéticas, as quais acarretam um aumento na liberação de partículas por parte do sol, podem alterar o comportamento típico de ocorrência de cintilações, causando geração de cintilação em circunstâncias em que ela normalmente não ocorreria, ou causando a inibição de cintilação em circunstâncias propícias à sua ocorrência. As tempestades magnéticas podem ser descritas pelo índice Dst (*Disturbance Storm-Time*), o qual é baseado em observações de magnetômetros distribuídos na região equatorial ao longo do globo terrestre e disponibilizado por centros especializados, como o World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (2015). de Paula et al. (2007) apresentam cenários de geração e de inibição de cintilação associadas a tempestades magnéticas nos anos de 2001 e 2003, respectivamente. É possível observar, para estes casos, o comportamento inesperado do valor do índice S4 observado por receptores GPS.

A assinatura padrão de uma tempestade magnética é caracterizada por um aumento sucinto no valor do Dst (expresso em nano-Tesla – nT), seguido de uma queda brusca e consequente recuperação até os níveis normais (ausência de tempestade) (YAMASHITA, 1999; PEREIRA, 2015).

A Figura 15 apresenta um período no qual caracteriza-se uma tempestade magnética e sua consequente influência no comportamento da cintilação. Ao observar o índice Dst, verifica-se a caracterização da assinatura padrão de uma tempestade magnética ocorrida aproximadamente entre os dias 19 e 22 de dezembro de 2015, em destaque na Fig. 15a. Sua relação com os níveis de cintilação é apresentada na Fig. 15b com dados de S4 considerando todos os satélites GPS para a estação FRTZ (Fortaleza/CE). Ao observar o índice S4 ao longo dos dias do referido mês, é possível notar a incidência de picos diários de cintilação, exceto no dia 21/12/2015, no qual observa-se a inibição. Trata-se de um caso típico de efeito de dínamo perturbado que gera um campo elétrico para oeste durante o dia e até às 21:00 local (aproximadamente). Este campo elétrico inibe a formação do pico pré-reversão da deriva do plasma. Como a deriva do plasma é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento das instabilidades RT, ocorre a inibição da formação das irregularidades no plasma ionosférico, bem como a consequente ausência de cintilação nos sinais GNSS (de PAULA et al., 2007).

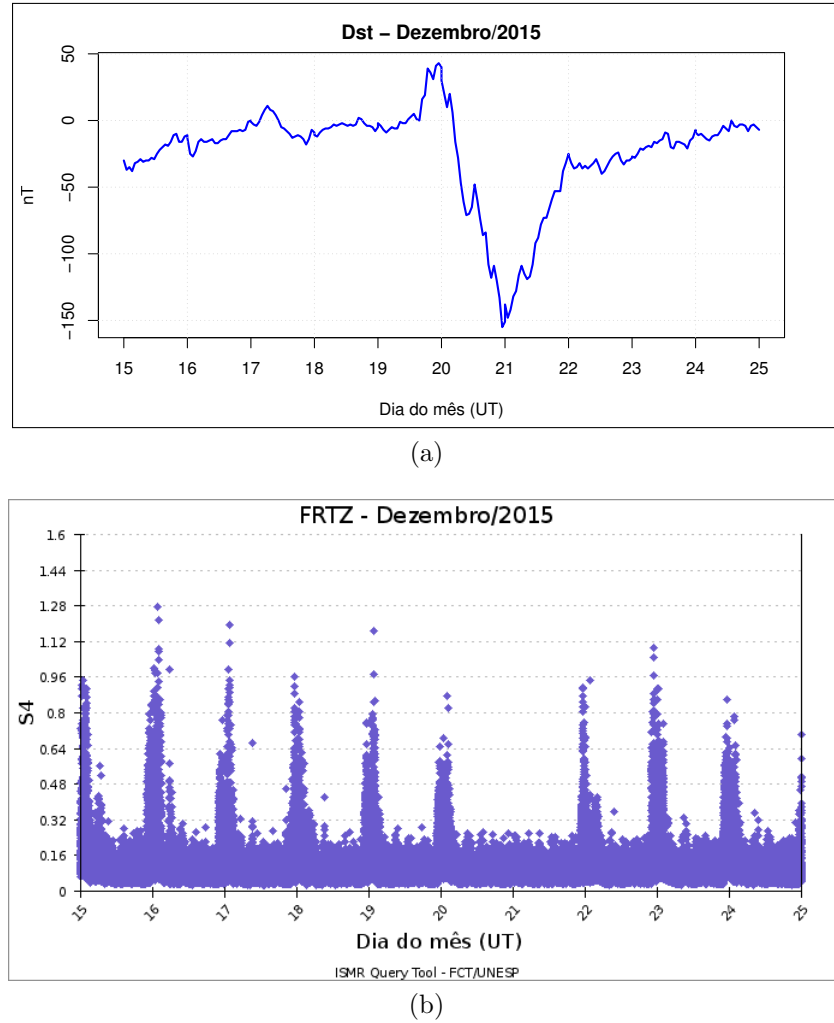


Figura 15 – Comportamento inesperado do índice S4 (inibição de cintilação no dia 21/12/2015) associado à variação no índice Dst: (a) Índice Dst no período de 15 a 24 de Dezembro/2015. Fonte: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (2015); (b) Índice S4 observado na estação FRTZ (Fortaleza/CE) no mesmo período (máscara de elevação de 20°).

2.4 Propagação de sinais em alinhamento com as irregularidades na ionosfera

Os principais índices de cintilação (S4 e Sigma-phi) proporcionam estimativas da severidade da mesma, sem qualquer relação direta com a direção do caminho de propagação do sinal do satélite até o receptor. Há apenas a relação implícita do percurso do sinal na camada da ionosfera. Por exemplo, o sinal de um satélite na direção zenital percorre um caminho menor ao longo da ionosfera do que de um satélite em um ângulo de elevação mais baixo. Recentemente, novos parâmetros complementares foram descritos na literatura para considerar a direção de propagação do sinal em um possível alinhamento com as irregularidades que causam as cintilações (MORAES et al., 2017). As bolhas ionosféricas que provocam tais irregularidades surgem na região do equador magnético e se propagam

na direção das linhas de campo magnético terrestre. Logo, dispor de informações visando identificar o alinhamento do sinal com as irregularidades pode ser útil.

Para a determinação dos parâmetros relacionados ao campo magnético terrestre, foi utilizado o modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), 12ª versão (THÉBAULT et al., 2015). Dentre os parâmetros proporcionados pelo IGRF, tem-se a inclinação ($\hat{I}$) e a declinação (δ) do campo magnético – os quais descrevem a direção das linhas de campo magnético. A Figura 16 apresenta alguns valores de inclinação e declinação calculados pelo IGRF sobre o território brasileiro para a época 2015 sendo projetados sobre o globo terrestre. É possível notar a região do equador magnético (onde a inclinação é nula).

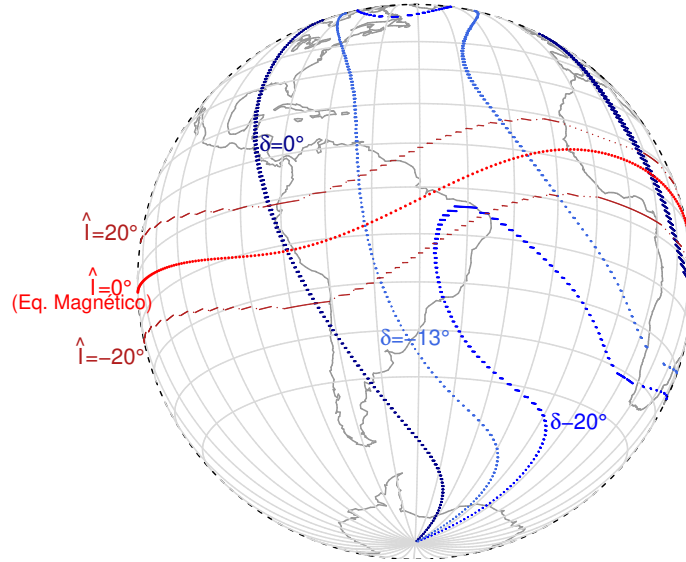


Figura 16 – Diferentes valores de inclinação (linhas em tons de vermelho) e declinação (linhas em tons de azul) obtidos pelo IGRF abrangendo a região brasileira para a época 2015.

Destaca-se que a latitude magnética pode ser obtida a partir da inclinação magnética $\hat{I}$ pela seguinte relação (LAUNDAL; RICHMOND, 2017):

$$Lat^{dip} = atan\left(\frac{1}{2}tan(\hat{I})\right) \quad (2.13)$$

Os valores de inclinação e declinação podem ser utilizados para a determinação de duas projeções angulares para relacionar a direção de propagação do sinal (satélite-receptor) e as direções das linhas de campo magnético pelas quais as irregularidades se propagam, conforme sugerido em Moraes et al. (2017). A primeira projeção (γ) representa o ângulo complementar ao azimuth geográfico do satélite e à declinação magnética na região do IPP. Uma representação gráfica do ângulo γ é apresentada na Figura 17. Na Fig. 17a, uma visão geral do cenário visando identificar a configuração do satélite, direção de propagação

do sinal, IPP (ponto rosa) e estação GNSS é apresentada; na Fig. 17b, apresenta-se um detalhamento, identificando o ângulo γ , complementar ao azimuth geográfico do satélite e à declinação magnética (δ), além do azimuth magnético.

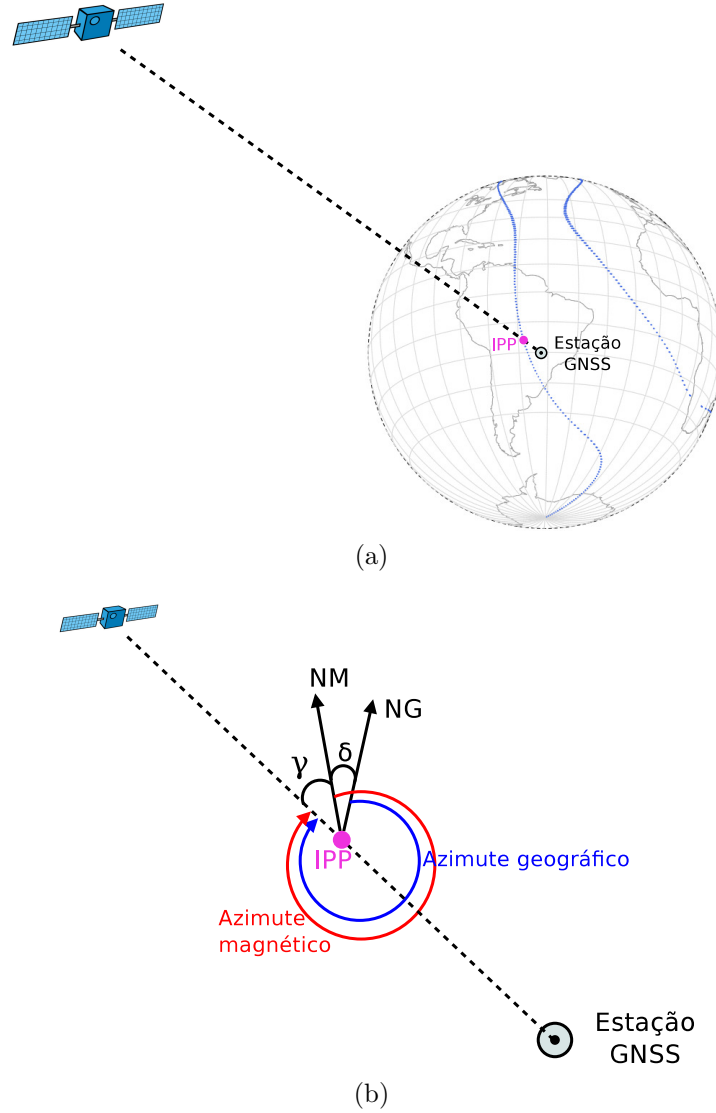


Figura 17 – Caracterização do ângulo γ na região do IPP: (a) configuração satélite-receptor; (b) detalhamento do azimuth geográfico (em azul), azimuth magnético (em vermelho), ângulo γ e declinação magnética δ (NM e NG referem-se, respectivamente, ao Norte Geográfico e Norte Magnético).

A segunda projeção utilizada é o ângulo β , o qual representa a diferença entre a elevação do satélite e a inclinação magnética na região do IPP (MORAES et al., 2017). A representação gráfica do ângulo β é apresentada na Figura 18. Considerando o IPP (representado pelo ponto rosa), são representados também os ângulos de elevação do satélite e o ângulo de inclinação magnética ($\hat{I}$) na região do IPP, bem como a linha de campo magnético em azul. Também é destacado (pelo pontilhado em vermelho) uma projeção da região do equador magnético (onde o ângulo de inclinação magnética é nulo).

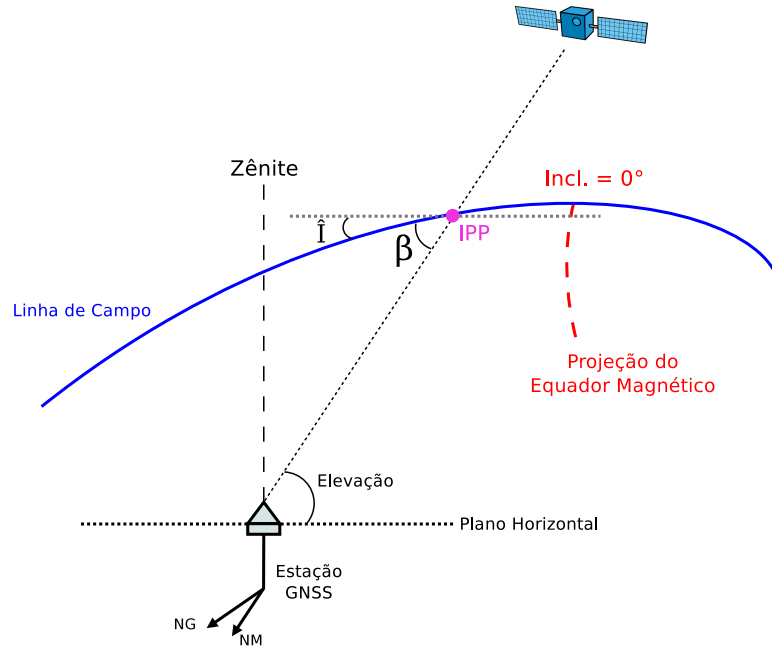
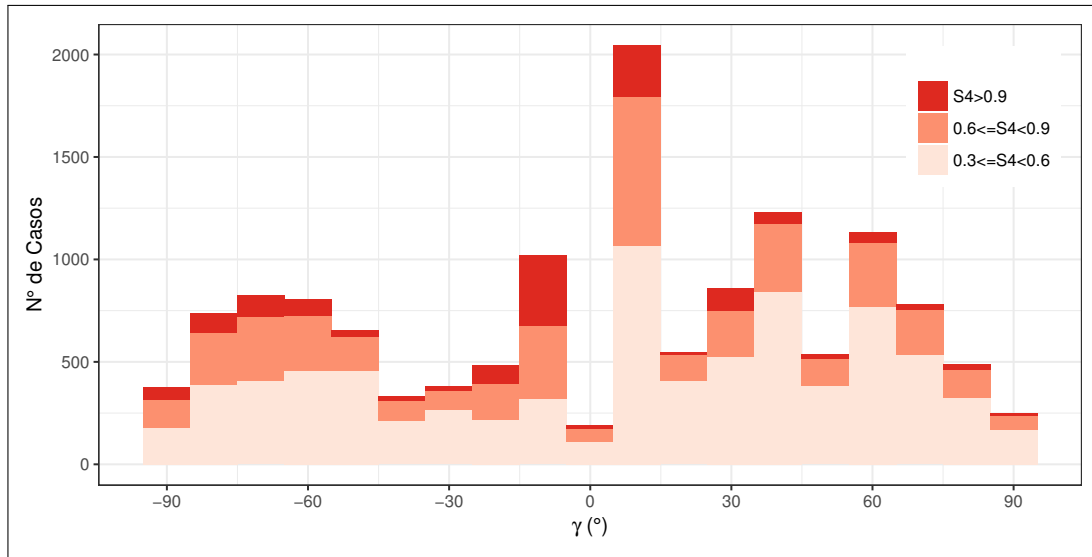


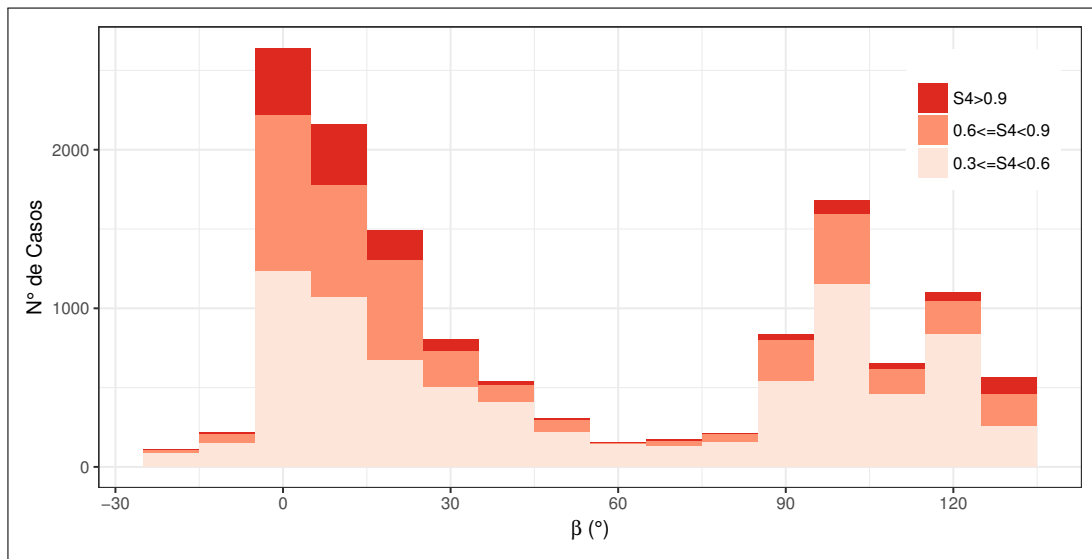
Figura 18 – Caracterização do ângulo β entre o ângulo de elevação do satélite e a inclinação magnética ($\hat{I}$) na região do IPP; NM e NG referem-se, respectivamente ao Norte Magnético e Norte Geográfico.

A Figura 19 apresenta um histograma de distribuição dos valores destes ângulos em função de níveis de índice S4. Os dados são referentes ao mês de Novembro/2014, coletados pela estação PRU2 (Presidente Prudente/SP). Na Fig. 19a, são apresentados os resultados para o ângulo γ . Na Fig. 19b, são apresentados os resultados para o ângulo β . Pode-se observar que há concentração de altos valores de índice S4 próximos a 0° , os quais indicam as direções de propagação mais próximas de estarem alinhadas a possíveis bolhas de plasma. Observa-se na Fig. 19a que o ângulo γ tem seu domínio no intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$. Exemplificando, o caso em que $\gamma = 0^\circ$ indica que a trajetória de propagação do sinal está alinhada em azimuth com a declinação do campo magnético. Já o domínio do ângulo β varia conforme a região do IPP e sua respectiva inclinação magnética. De maneira similar, o caso em que $\beta = 0^\circ$ indica que a trajetória de propagação do sinal está alinhada em elevação com a inclinação do campo magnético. O caso em que $\gamma \approx 0^\circ$ e $\beta \approx 0^\circ$, simultaneamente, indica que a trajetória de propagação do sinal está mais próxima de estar alinhada com o campo magnético, situação em que são esperados os maiores valores no índice S4 e consequentemente as maiores degradações causadas pela cintilação nas observáveis GNSS, conforme demonstrado em Moraes et al. (2017).

Um exemplo similar é apresentado para a estação SJCU (São José dos Campos/SP) na Figura 20. Assim como nos dados de Presidente Prudente, observa-se a alta concentração de valores altos de índice S4 quando os valores dos ângulos de aproximam de 0° . Os resultados evidenciam o potencial de utilização destes ângulos para descrever as cintilações – em complemento a outros indicadores como o índice S4 e o índice Sigma-phi.

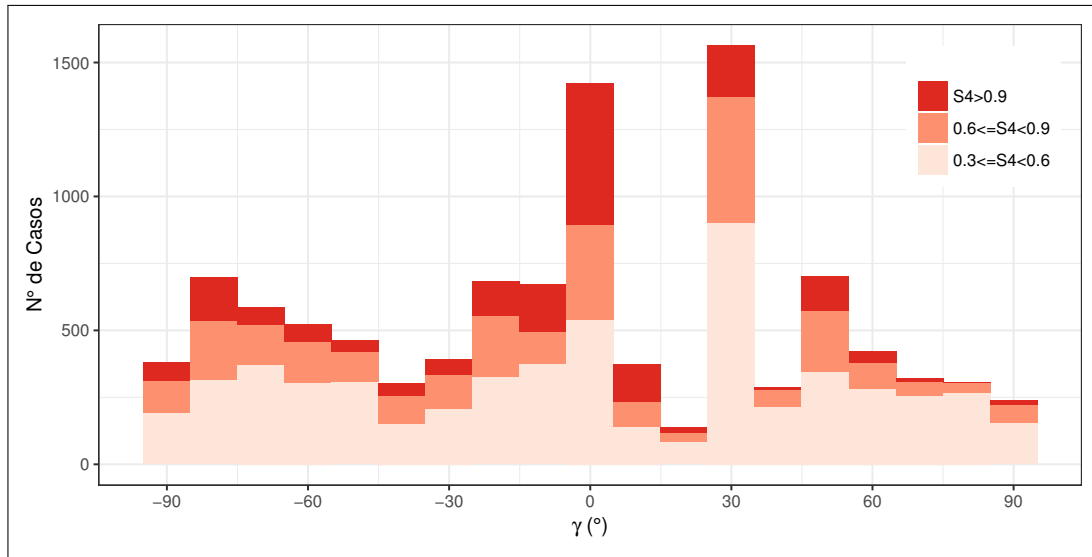


(a)

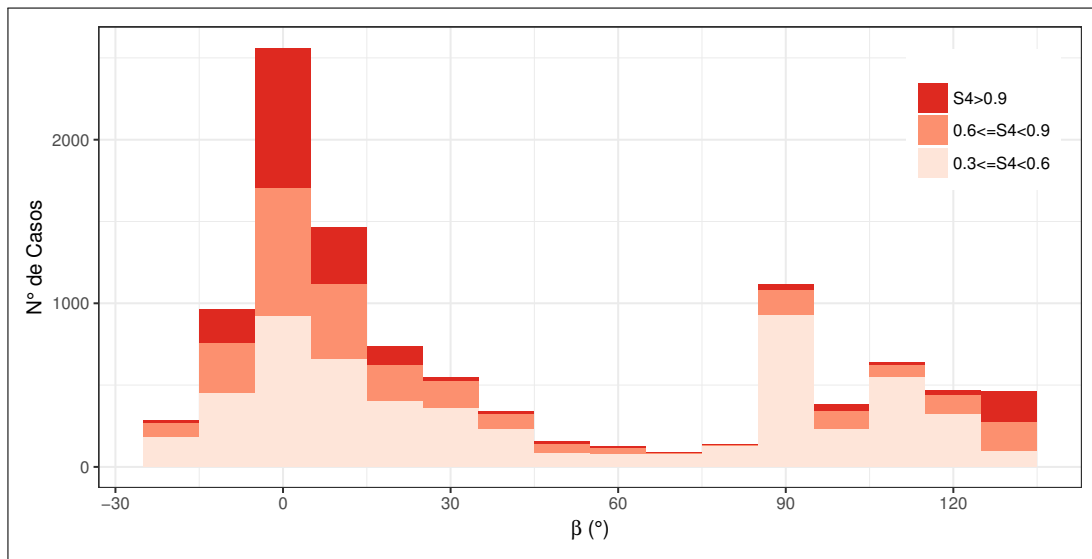


(b)

Figura 19 – Histograma de distribuição dos ângulos (a) γ e (b) β em função de valores de índice S4. Dados da estação PRU2 coletados em Novembro/2014.



(a)



(b)

Figura 20 – Histograma de distribuição dos ângulos (a) γ e (b) β em função de valores de índice S4. Dados da estação SJCU coletados em Novembro/2014.

3 Efeito da Cintilação no GNSS

A consequência da cintilação nas observáveis GNSS e no posicionamento GNSS não é imediata. Apenas a observação de altos valores de índice S4 (ou Sigma-phi) pode ser insuficiente para descrever o efeito deste fenômeno nas observáveis e no posicionamento GNSS.

Na seção 3.1, uma discussão sobre como os efeitos da cintilação ionosférica afetam as observáveis e os diferentes métodos de posicionamento GNSS é apresentada. Na seção 3.2, são apresentados modelos de variância de erro de rastreamento descritos na literatura, os quais associam índices de cintilação e parâmetros internos do receptor para estimar as incertezas esperadas nas principais observáveis GNSS (pseudodistância e fase). Posteriormente, os valores obtidos por estes modelos têm potencial de uso na mitigação dos efeitos da cintilação no posicionamento, conforme será abordado no Capítulo 4.

3.1 Efeitos nas observáveis e no posicionamento

Os efeitos da cintilação ionosférica nas observáveis GNSS de pseudodistância e fase – medidas práticas de distância com as quais se obtém o posicionamento – variam de acordo com as configurações de rastreamento de cada receptor, as quais são definidas nos circuitos internos denominados *Phase Locked Loop* (PLL), responsável pelo rastreamento da fase da onda portadora, e *Delay Locked Loop* (DLL), responsável pelo rastreamento do código, ambos no domínio do tempo. Algumas configurações internas podem tornar o receptor mais (ou menos) sensível às cintilações (FORTE, 2012), como por exemplo, a largura de banda ou o intervalo de tempo empregado na correlação do sinal (I/Q). No contexto do posicionamento GNSS, os efeitos podem ser descritos, em síntese, como degradação na acurácia das medidas de distância satélite-receptor (pseudodistância e fase) e perdas de sincronismo durante o rastreamento do sinal.

As degradações da acurácia nas observáveis são causadas por erros de rastreamento induzidos pelas cintilações no PLL/DLL do receptor e por perda de ciclos (FORTE, 2012; ZHANG; GUO; ZHOU, 2014). Considerando a pseudodistância, a degradação está relacionada à determinação do tempo de propagação do sinal (o qual permite determinar a distância geométrica satélite-receptor). A estimativa do tempo de propagação é afetada por possíveis erros de rastreamento no DLL do receptor, causando degradação na referida observável. Já no contexto da observável de fase, incertezas no PLL do receptor são induzidas por perdas de ciclo (BÉNIGUEL et al., 2011; FORTE, 2012).

Uma perda de sincronismo (ou perda de *lock*) ocorre quando o receptor perde com-

pletamente o rastreamento do sinal. Consequentemente, ocorre uma lacuna de observáveis até a completa reaquisição do mesmo.

A observável de fase da onda portadora é baseada na diferença de fase entre o sinal recebido e sua réplica gerada no receptor. Se o rastreamento prossegue sem interrupção, um contador de ciclos inteiros é iniciado, o qual é incrementado cada vez que a fase de batimento muda de 0 para 2π . O número inteiro de ciclos no instante da primeira observação é desconhecido (ambiguidade), assim como uma fração de ciclo inicial. Em circunstâncias de cintilação, o receptor pode perder a contagem do número inteiro de ciclos – evento denominado perda de ciclo (ou *cycle slip*). A ocorrência de perdas de ciclo pode ser um dos critérios para que o PLL do receptor saia do estado de sincronismo. Quando isto ocorre, as réplicas da fase gerada no receptor são imprecisas, o que causa, em casos extremos, a interrupção no rastreamento e a consequente lacuna de observáveis (MORAES, 2008).

Além das perdas de sincronismo, as lacunas nas observáveis também podem estar associadas à máscara de razão sinal-ruído ou às ambiguidades de meio ciclo (denominadas ambiguidades *half-cycle* na literatura em inglês) (HUMPHREYS et al., 2010; SREEJA et al., 2012).

Alguns receptores, como o PolaRxS, possuem uma configuração para definir uma máscara baseada na observável de razão sinal-ruído (C/N_0). Se aplicada, o usuário pode definir um limiar no valor de C/N_0 (por exemplo, 15 dB-Hz) para descartar observáveis caso este valor seja atingido, causando lacunas nas observáveis de pseudodistância e fase. O receptor pode se tornar mais (ou menos) suscetível às lacunas de acordo com a escolha deste limiar (SREEJA et al., 2012). Nos experimentos realizados nesta tese, o valor da máscara de razão sinal-ruído adotado (25 dB-Hz) não causou lacunas nos dados.

Já as ambiguidades *half-cycle* são causadas por desvanecimentos severos na intensidade do sinal, os quais acontecem simultaneamente com variações abruptas na fase. Humphreys et al. (2010) denomina este tipo de evento como “*canonical fading*” – casos em que o desvanecimento na intensidade do sinal tem severidade e rapidez suficientes para causar uma variação abrupta e inesperada na fase. Esta variação inesperada na fase aparece na forma de uma mudança de fase de aproximadamente meio ciclo, causando, portanto, uma incerteza no PLL do receptor.

Nos dados dos receptores PolaRxS, apenas as observáveis com ambiguidades inteiras são incluídas nos arquivos de observação durante a conversão para o formato RINEX¹. As observáveis caracterizadas com ambiguidade *half-cycle* são descartadas automaticamente durante a conversão, causando lacunas nas observáveis nos respectivos arquivos RINEX. Para o caso do GPS, as lacunas afetam a disponibilidade da observável de fase derivada do

¹ Comunicação privada da equipe de suporte da Septentrio Satellite Navigation, recebida em 29/06/2017.

código L1(C/A) ($\phi_{L1(C/A)}$), por exemplo. Em contrapartida, este problema não ocorre na observável de fase derivada do código modernizado L2C (ϕ_{L2C}) ou L5 (ϕ_{L5}), cujos sinais contém um componente piloto (sem dados) designado para permitir melhorias durante o rastreamento. Este componente permite o rastreamento de ambiguidades inteiras, fazendo com que as respectivas observáveis não sejam suscetíveis ao problema de ambiguidades *half-cycle* (FONTANA et al., 2001).

Alguns destes aspectos são exemplificados na Figura 21, a qual apresenta um período de 5 minutos de rastreamento da observável $\phi_{L1(C/A)}$ para a estação SJCUC na noite de 6 de Novembro de 2014 (PRN 24). Na Fig. 21a, as observáveis de fase – conforme obtidas no arquivo RINEX de observação com taxa de amostragem de 1 segundo – são apresentadas. É possível observar a presença de inúmeras lacunas afetando a disponibilidade de dados da observável. Na Fig. 21b, os respectivos valores do índice S4 e Sigma-phi são apresentados. Nota-se que as lacunas afetaram a disponibilidade do índice Sigma-phi a partir das 19:36, evidenciando a presença de uma perda de sincronismo. De fato, tal perda de sincronismo ocorreu e pode ser observada na Fig. 21c, onde a fase filtrada do sinal a 50 Hz é apresentada. Os pontos em cinza indicam os casos em que ocorreu lacuna na respectiva observável de fase no arquivo RINEX de observação devido à ambiguidade *half-cycle*. Já o ponto em vermelho indica o momento no qual houve uma perda de sincronismo. Verifica-se que a lacuna causada pela perda de sincronismo afetou o processo de filtragem da fase a 50 Hz, o que inviabiliza a estimativa do índice Sigma-phi. Quando uma perda de sincronismo ocorre, não há quaisquer dados disponíveis até a completa reaquisição do sinal. De maneira similar, na Fig. 21d, a intensidade normalizada do sinal (em dB) é apresentada, tendo os pontos em cinza e em vermelho o mesmo significado da Fig. 21c.

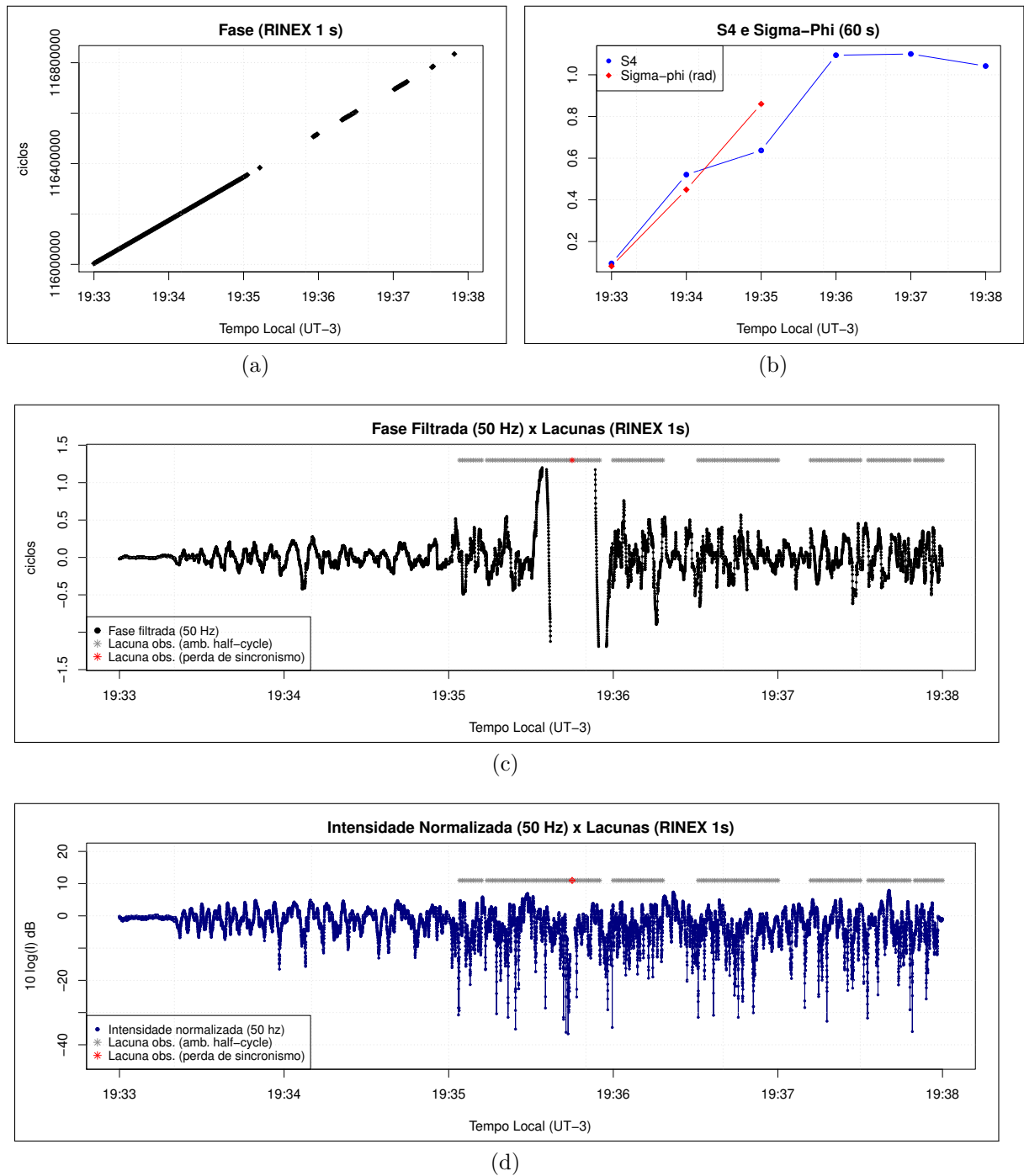


Figura 21 – Caracterização de lacunas nas observáveis: (a) observável de fase $\phi_{L1(C/A)}$ obtida no arquivo RINEX (1s); (b) respectivos índices S4 e Sigma-phi; (c) respectiva fase filtrada (a 50 Hz) e indicativos de lacunas nas observáveis; (d) respectiva intensidade normalizada (a 50 Hz) e indicativos de lacunas nas observáveis. Dados coletados na estação SJCU (PRN 24) na noite de 06 de Novembro de 2014.

Considerando o domínio dos diferentes métodos de posicionamento, degradações na acurácia das observáveis (pseudodistância e/ou fase) certamente são fatores prejudiciais. Este aspecto fica mais evidente nos métodos de alta precisão baseados na observável de fase da onda portadora (como o PPP e o RTK), os quais apresentam maior sensibilidade às perdas de ciclo e perdas de sincronismo. As lacunas de observáveis são extremamente prejudiciais em processos de redução de ruídos, como a pseudodistância suavizada pela fase. Elas também limitam a realização de diferenciações ou combinações lineares entre as observáveis – tais como simples diferenças, duplas diferenças e combinação *ion-free* – abordagens comumente presentes em diferentes métodos de posicionamento de alta acurácia. Cabe destacar que alguns métodos são descritos na literatura para a detecção e/ou correção das perdas de ciclo. No entanto, a ocorrência de sucessivas perdas de ciclo pode inviabilizar a eficácia destes métodos (MONICO, 2008). A ocorrência de perdas de ciclo (ou lacunas) nos dados em casos de manutenção de sincronismo também pode induzir algoritmos de detecção de perdas de ciclo a uma falsa detecção (ZHANG; GUO; ZHOU, 2014). Ressalta-se também que, em caso de super abundância de satélites disponíveis (por exemplo, por meio da integração de satélites de diferentes constelações), perdas de sincronismo que afetem um (ou poucos satélites, relativamente) tendem a ser menos prejudiciais ao posicionamento.

3.2 Modelos para a Variância do Erro de Rastreamento

Modelos descritos na literatura permitem estimar o erro de rastreamento esperado nas diferentes observáveis GNSS. Tais modelos são baseados em estimativas acerca do comportamento dos circuitos internos de rastreamento do receptor (PLL e DLL). Dentre os descritos destacados na literatura, destaca-se o modelo de Conker (CONKER et al., 2003) e versões modificadas ou adaptadas do mesmo, os quais são discutidos nesta seção. Cabe ressaltar que estes modelos visam determinar o erro esperado devido às cintilações no receptor do usuário. Por esta razão, abrangem características internas do receptor (as quais podem variar de acordo com o fabricante do mesmo), índices de cintilação e propriedades de cada observável.

O modelo de Conker permite estimar o erro de rastreamento esperado em determinadas observáveis GPS. Tal modelo admite dentre seus parâmetros de entrada índices de cintilação, propriedades da observável e configurações internas do receptor. De acordo com o modelo, para as observáveis de fase, a variância do erro de rastreamento esperado no PLL de um receptor GPS ($\sigma_{\phi_\varepsilon}^2$) pode ser expressa por três componentes:

$$\sigma_{\phi_\varepsilon}^2 = \sigma_{\phi_S}^2 + \sigma_{\phi_T}^2 + \sigma_{\phi_{Osc}}^2 \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1, $\sigma_{\phi_S}^2$ é o componente de erro devido à cintilação, $\sigma_{\phi_T}^2$ é o componente

de ruído térmico e $\sigma_{\phi_{Osc}}^2$ é o componente de ruído do oscilador do receptor. O modelo considera que não há correlação entre as cintilações de amplitude e de fase. O modelo também não considera possíveis efeitos de multicaminhamento do sinal.

Exemplificando, para o caso da observável de fase L1 baseada no código C/A ($\phi_{L1(C/A)}$), o componente de ruído térmico é expresso por:

$$\sigma_{\phi_{L1(C/A)}}^2 = \frac{B_n \left[1 + \frac{1}{2\eta(c/n_0)_{L1(C/A)}(1-2S4_{(L1)}^2)} \right]}{(c/n_0)_{L1(C/A)}(1-S4_{(L1)}^2)} \quad (3.2)$$

onde:

- B_n é a largura de banda do PLL do receptor;
- $(c/n_0)_{L1(C/A)}$ é a forma fracional da razão sinal-ruído ($10^{0,1(C/N_0)_{L1(C/A)}}$, onde C/N_0 é expresso em dB-Hz);
- η é o tempo de integração de pré-deteção (ou correlação).

Para o componente de erro devido à cintilação da mesma observável, tem-se:

$$\sigma_{\phi_{S_{L1(C/A)}}}^2 = \frac{\pi T}{k f_n^{(p-1)} \text{sen} \left(\frac{[2k+1-p]\pi}{2k} \right)} \quad (3.3)$$

tendo que:

- T é a força espectral do sinal a 1 Hz (em rad^2/Hz);
- p é a inclinação da densidade de potência espectral do sinal;
- k é a ordem do PLL do receptor;
- f_n é a frequência natural do PLL (em Hz).

Conforme mencionado na subseção 2.2.1, os valores de p e T podem ser calculados a partir da transformada de Fourier da fase filtrada do sinal amostrada a 50 Hz. Tais valores possuem uma relação com o índice Sigma-phi (STRANGWAYS et al., 2011), e também estão presentes em um arquivo “.ismr” padrão do receptor PolaRxS. Estes valores caracterizam as cintilações de fase no modelo de Conker.

Para o componente de erro referente ao oscilador do receptor na Equação 3.1, atribui-se um valor constante de acordo com a estabilidade do oscilador do mesmo (por exemplo, $\sigma_{\phi_{Osc}} = 0,1 \text{ rad}$) (CONKER et al., 2003).

As demais equações do modelo de Conker são definidas para as variâncias de erro de rastreamento esperado na observável de fase L2 baseada no código P(Y) ($\phi_{L2/P(Y)}$), pseudodistância em L1 baseada no código C/A ($PD_{L1(C/A)}$) e pseudodistância em L2 baseada no código P(Y) ($PD_{L2/P(Y)}$) (CONKER et al., 2003).

O modelo de Conker apresenta algumas limitações. Observa-se a demanda por diversos parâmetros internos do receptor, os quais podem ser difíceis de se obter em alguns casos. Por exemplo, para o caso dos receptores Septentrio PolaRxS PRO, utilizados neste trabalho, apenas os valores de largura de banda do PLL/DLL do receptor (B_n) e tempo de integração de pré-deteção (η) foram disponibilizados pelo fabricante. Outros parâmetros, como exemplo, a frequência natural do PLL (f_n) e a ordem do PLL (k), são considerados proprietários e não disponibilizados. Neste caso, a implementação do modelo requer a utilização de valores empíricos, aproximados ou arbitrados.

Ressalva-se também a restrição no modelo para valores de $S4_{(L1)} < 0.707$. Para valores a partir deste limiar, o modelo admite uma perda de sincronismo. No entanto, é possível que o receptor mantenha o rastreamento mesmo em casos de $S4_{(L1)} \geq 0.707$.

Outra limitação presente no modelo se refere à taxa de amostragem. Alguns parâmetros presentes no modelo, tais como os índices S4 e índices espectrais p e T são normalmente disponibilizados pelos ISMRs em intervalos de 60s, o que dificulta a aplicação do modelo para aplicações em amostragens diferentes, como 1s ou 15s. Além disso, os valores de p e T , estimados a partir da fase filtrada do sinal em alta taxa de amostragem (50 Hz), são sensíveis a lacunas nos dados, o que causa indisponibilidade dos mesmos em caso de perda de sincronismo em um dado minuto.

Algumas destas limitações são discutidas em Park et al. (2017), onde uma modificação ao modelo de Conker é proposta. Neste modificação, uma formulação alternativa para o cálculo do índice S4 é apresentada. O objetivo é reduzir a quantidade de valores de $S4_{(L1)} \geq 0.707$ e permitir a utilização de diferentes taxas de amostragem. Tal abordagem, denominada Conker' pelos autores, ameniza algumas das limitações presentes no modelo original.

Uma outra possível limitação presente no modelo de Conker refere-se à pressuposição da distribuição estatística Nakagami-m para descrever as cintilações de amplitude. Conforme apresentado em Moraes et al. (2013), a distribuição α - μ (YACOURB, 2007) é mais adequada para descrever as cintilações de amplitude se comparada a outras distribuições, como a Nakagami-m, Rice e Weibull. A distribuição α - μ inclui casos especiais de outras distribuições, como a Nakagami-m, Weibull e Rayleigh. Sua função de distribuição de probabilidade é expressa por dois coeficientes α e μ , e é dada por:

$$f(r) = \frac{\alpha r^{\alpha\mu-1}}{\xi^{\alpha\mu/2} \Gamma(\mu)} \exp\left(-\frac{r^\alpha}{\xi^{\alpha/2}}\right) \quad (3.4)$$

onde r é a amplitude normalizada do sinal (tal que $E[r^2] = 1$), $\Gamma(x)$ é a função Gamma e o termo ξ é expresso por:

$$\xi = \frac{\Gamma(\mu)}{\Gamma(\mu + 2/\alpha)} \quad (3.5)$$

Os parâmetros α e μ são fisicamente descritos, sendo α um parâmetro que descreve a potência e μ um parâmetro relacionado ao número de componentes de multicaminhamento do sinal no meio de propagação ((YACOUN, 2002; YACOUN, 2007; MORAES et al., 2013)).

A estimativa dos valores de α e μ pode ser realizada de diferentes maneiras a partir de dados brutos da intensidade do sinal. Uma forma é utilizar o caso especial da distribuição α - μ que inclui a distribuição Nakagami- m para encontrar um par de coeficientes α e μ que se relaciona com o valor de m (onde m é o parâmetro único da distribuição Nakagami- m) e com o valor do índice S4 em um sistema de equações (YACOUN, 2007; MORAES et al., 2013). Nos resultados obtidos nesta tese, os valores de α e μ foram estimados via software utilizando-se a linguagem de programação e ambiente de desenvolvimento R (R Core Team, 2017) e a função “fitdistr”, que adota o método de máxima verossimilhança para ajustar coeficientes de uma função de distribuição a partir de dados (VENABLES; RIPLEY, 2002).

Ao assumir a distribuição α - μ , tem-se como vantagem a utilização dois parâmetros para descrever as cintilações. Em complemento, pode-se analisar, por exemplo, o valor de α e do índice S4 para uma descrição mais completa. Em algumas circunstâncias, como durante cintilações fortes, o índice S4 pode proporcionar uma descrição incompleta das cintilações, conforme destacado em Humphreys, Psiaki e Kintner (2010). Um exemplo é apresentado na Figura 22. São apresentados dados 50 Hz de intensidade normalizada do sinal observados pela estação SJCUI no dia 13/02/2015 durante três minutos distintos na mesma noite (22:37, 22:40 e 23:28, UT-3). Embora os três minutos tenham apresentado $S4 \approx 0,66$, é possível observar os diferentes padrões de intensidade observados durante cada um dos minutos. Por exemplo, durante o minuto das 23:28, o valor do S4 foi inflado por uma flutuação lenta na intensidade; pode-se concluir que o valor do índice indicou falsamente a presença de cintilação. No minuto das 22:37, observa-se a presença de desvanecimentos menos severos do que os observados durante o minuto das 22:40. Observa-se que a análise conjunta do valor de α em complemento ao valor do índice S4 é capaz de fornecer uma descrição mais robusta acerca da severidade das cintilações, ou seja, os cenários mais críticos aparecem para valores de α e de S4 mais altos concomitantemente.

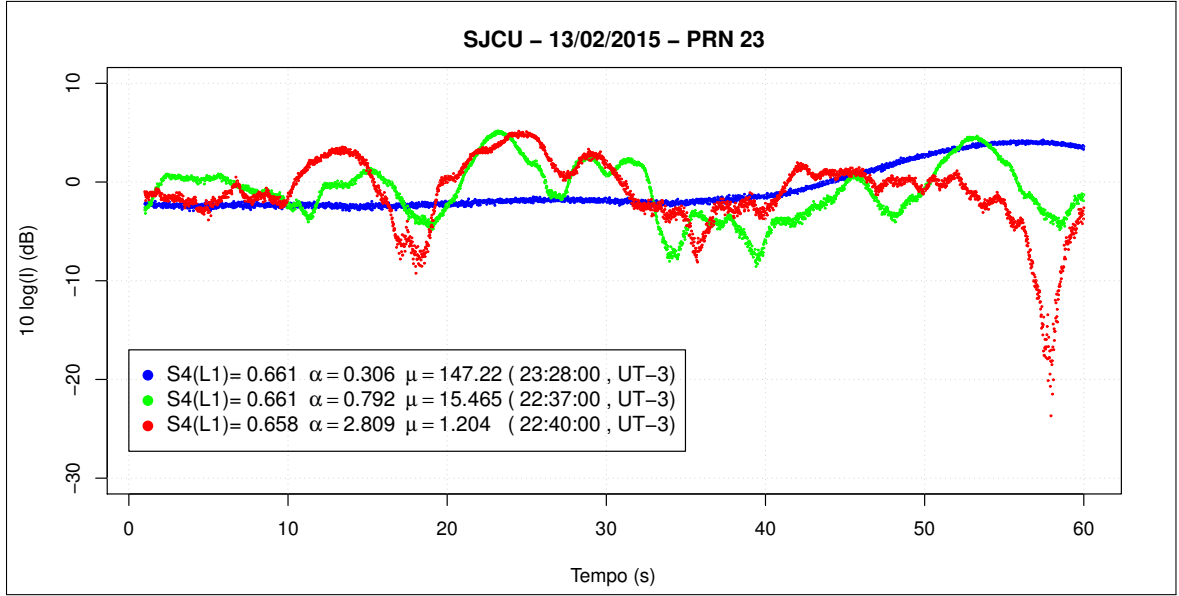


Figura 22 – Intensidade do sinal normalizada em três minutos distintos, os quais apresentam valores de $S4$ similares ($S4 \approx 0,66$), mas diferentes valores para o par α - μ . Dados da estação SJCUC coletados no dia 14/02/2015 (PRN 23).

Tomando como base as contribuições da distribuição α - μ , uma versão estendida do modelo de Conker é apresentada em Moraes et al. (2014). Neste modelo estendido, admite-se também que as cintilações de amplitude e de fase são correlacionadas. Para o caso das observáveis de fase, a variância do erro de rastreamento (Equação 3.1) passa ter um componente adicional, sendo reescrita como:

$$\sigma_{\phi_\varepsilon}^2 = \sigma_{\phi_S}^2 + \sigma_{\phi_T}^2 + \sigma_{\phi_{Osc}}^2 + 2\rho\sigma_{\phi_S}\sigma_{\phi_T} \quad (3.6)$$

Na Equação 3.6, ρ é um coeficiente de correlação entre os erros devido a cintilações de amplitude e de fase. Neste trabalho, adotou-se $\rho = 0,8$ (valor adotado empiricamente que reflete a condição de que as cintilações de amplitude são normalmente acompanhadas às cintilações de fase). Exemplificando para o caso da observável de fase L1 baseada no código C/A ($\phi_{L1(C/A)}$), o componente de ruído térmico passa a ser escrito por (MORAES et al., 2014):

$$\sigma_{\phi_{T_{L1(C/A)}}}^2 = \frac{B_n}{(c/n_0)_{L1(C/A)}\xi\Gamma(\mu)} \left(\Gamma(\mu - 2/\alpha) + \frac{\Gamma(\mu - 4/\alpha)}{2\eta(c/n_0)_{L1(C/A)}\xi} \right) \quad (3.7)$$

De maneira similar ao modelo de Conker, as demais equações do modelo podem ser utilizadas para obter estimativas para a variância do erro de rastreamento para determinadas observáveis GPS de fase ($\phi_{L1(C/A)}$, $\phi_{L2/P(Y)}$) e de pseudodistância ($PD_{L1(C/A)}$, $PD_{L2/P(Y)}$).

Outras variações/adaptações ao modelo de Conker estão descritas na literatura. Por exemplo, Elmas (2013) apresenta um modelo no qual as estimativas do erro de rastreamento no PLL e no DLL do receptor são obtidas com base em premissas definidas no modelo de Conker e nos dados de correlação em fase e quadratura de fase sinal (I_{corr} e Q_{corr} , respectivamente). Em Marques (2013), a utilização de um componente adicional de variância utilizado em complemento ao modelo de Conker é objeto de investigação. Este componente adicional objetiva aplicar uma função de mapeamento na variância das observáveis de acordo com o ângulo de elevação dos satélites de maneira com que os satélites mais baixos, por estarem mais suscetíveis a efeitos de multicaminhamento do sinal (dentre outros aspectos), tenham sua variância inflada. Resultados de aplicação destas abordagens não foram incluídos no escopo desta tese.

3.2.1 Exemplos de variância estimada pelos modelos

Dados de intensidade e fase coletados a uma taxa de amostragem de 50 Hz foram analisados com o objetivo de se realizar inferências acerca do efeito da cintilação ionosférica nas observáveis GNSS (as quais são normalmente amostradas em taxas inferiores, como 1 Hz). Em complemento, foram avaliados os resultados obtidos para a variância de observáveis de acordo com o modelo de Conker (CONKER et al., 2003) e de sua versão estendida baseada na distribuição α - μ (MORAES et al., 2014), além de outros indicadores como os ângulos γ e β descrevendo o alinhamento do sinal com as linhas de campo magnético.

A Figura 23 apresenta um exemplo de diferentes indicadores aplicados a dados coletados na estação SJCUI (PRN 18 – frequência L1) na noite de 17 de Novembro de 2014. O objetivo da figura é permitir uma comparação visual entre diferentes parâmetros estimados em diferentes taxas de amostragem.

Na Fig. 23a, a intensidade do sinal a 50 Hz é apresentada. Pode-se notar que desvanecimentos severos (até ≈ -47 dB) foram observados. A ocorrência de desvanecimentos (conforme observados nos dados a 50 Hz) reflete em valores mais altos de índice S4, estimado a cada 60 segundos conforme pode ser visto na Fig. 23b. No comparativo, fica evidente o aspecto prático do índice S4 sumarizando milhares de registros de intensidade.

Na Fig. 23c, a fase filtrada do sinal a 50 Hz é apresentada, permitindo notar que os desvanecimentos em intensidade são acompanhados de flutuações na fase. Com o objetivo de realizar inferências sobre as degradações na respectiva observável de fase ($\phi_{L1(C/A)}$) obtida do arquivo RINEX com taxa de observação de 1s, a tripla-diferença da observável ao longo do tempo é apresentada na Fig. 23d (a tripla-diferença foi adotada pra remover os efeitos da órbita e relógio do satélite). Pode-se observar que na ausência de cintilação (por exemplo, após as $\approx 21:20$), o valor da tripla-diferença fica em torno de 0. Durante as flutuações de intensidade mais fortes, o valor supera os $\approx 0,80$ m, o que permite inferir a

ocorrência de perdas de ciclo e degradações na acurácia da observável de fase.

Na Fig. 23e, os valores obtidos para descrever o desvio-padrão esperado da respectiva observável ($\phi_{L1(C/A)}$) de acordo com o modelo de Conker e de sua versão estendida baseada na distribuição α - μ são apresentados. Ambos foram estimados com taxa de 60 segundos. Observa-se a limitação do modelo de Conker para valores de $S4_{L1} > 0,707$, a qual é superada pelo modelo estendido baseado na distribuição α - μ . Por fim, na Fig. 23f, observa-se o alinhamento do sinal com as linhas de campo magnético – situação propícia a ocorrência de cintilações ainda mais severas – como foi o caso deste exemplo.

Para o caso da pseudodistância, dois exemplos são apresentados na Figura 24, considerando o mesmo período apresentado na Figura 23. Na Fig. 24a, a tripla-diferença da pseudodistância é apresentada. Pode-se notar que os valores mais altos acompanham os desvanecimentos mais severos do sinal (apresentados na Fig. 23a). Na Fig. 24b, os respectivos desvios-padrão para a observável $PD_{L1(C/A)}$ obtidos pelos modelos de Conker e α - μ são apresentadas (estimados com intervalo de 60 segundos). Novamente, verifica-se que o modelo α - μ supera a limitação presente no modelo de Conker para valores de $S4_{L1} \geq 0.707$.

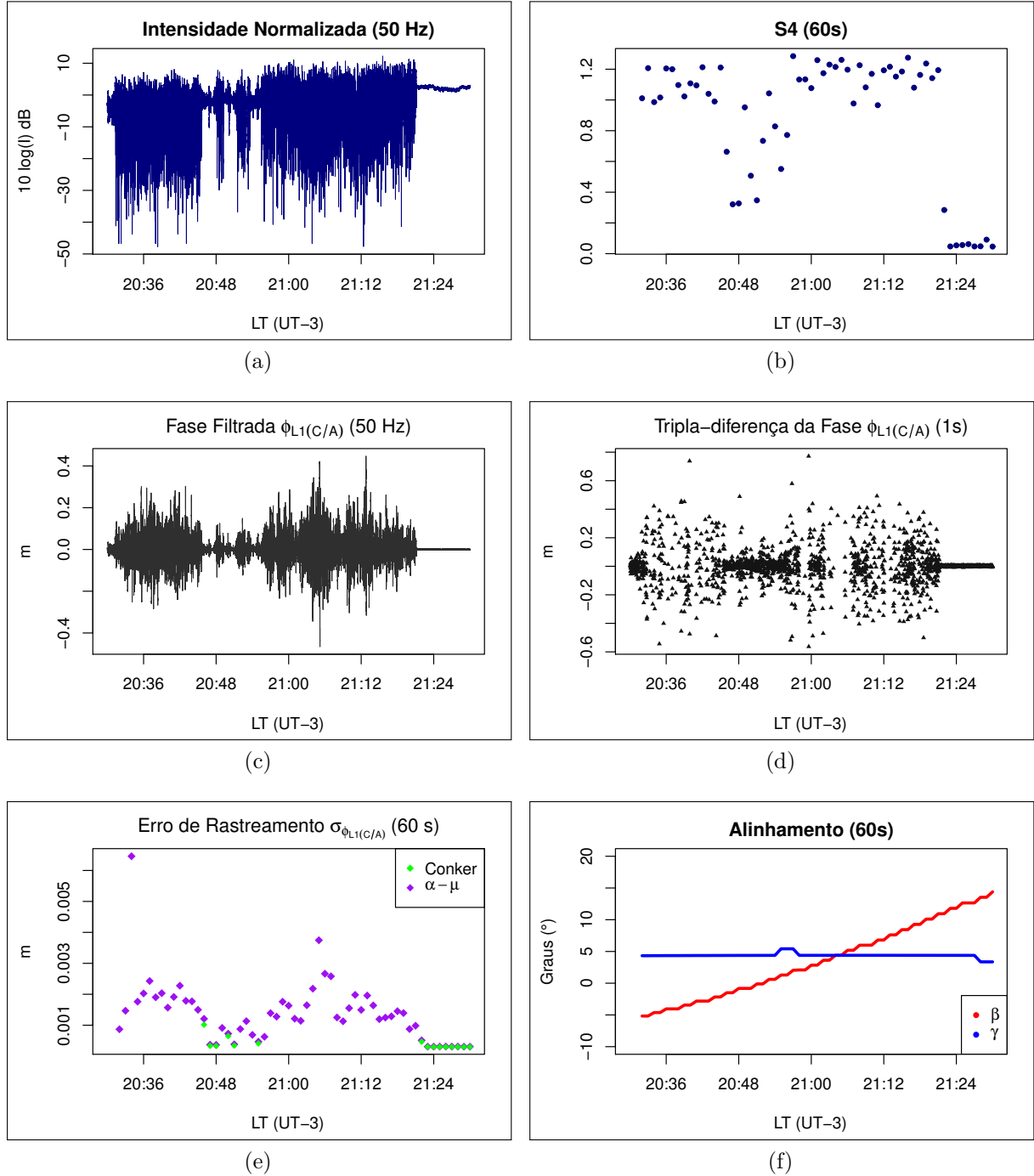


Figura 23 – Diferentes indicadores descrevendo a severidade da cintilação afetando o rastreamento de um satélite ao longo do tempo. Dados coletados na estação SJCU (PRN 18) na noite de 17 de Novembro de 2014.

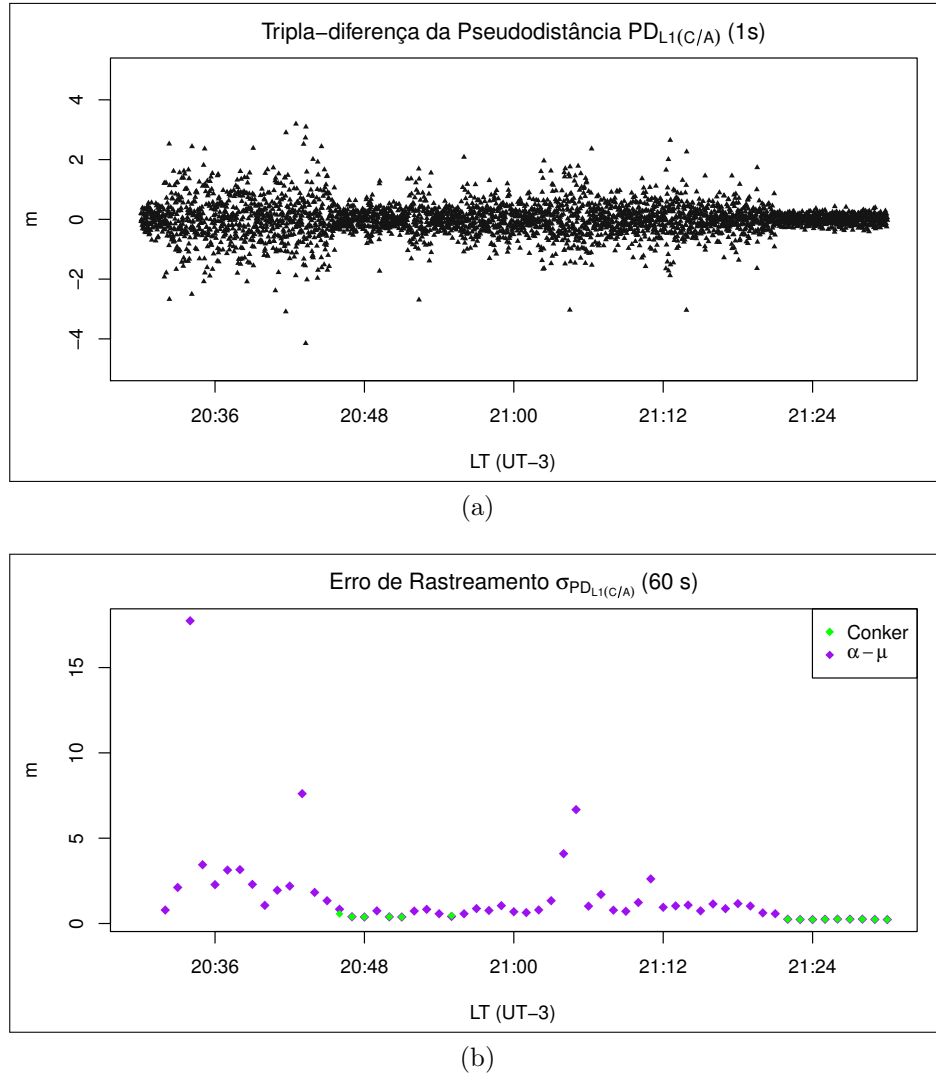


Figura 24 – (a) Tripla-diferença da pseudodistância $PD_{L1(C/A)}$; (b) Desvio-padrão da observável estimado de acordo com os modelos de Conker e $\alpha-\mu$. Dados coletados na estação SJCUC (PRN 18) na noite de 17 de Novembro de 2014.

3.3 Discussão e comentários

Neste capítulo, aspectos sobre o efeito da cintilação ionosférica nas observáveis GNSS foram abordados. Com a análise dos dados obtidos a 50 Hz, foi realizada uma caracterização das cintilações de amplitude e de fase. Foram apresentados aspectos sobre os desvanecimentos na intensidade do sinal (*fadings*) que caracterizam as cintilações de amplitude, bem como das flutuações na fase conforme identificadas em análises da fase filtrada do sinal.

Foram apresentados exemplos com degradação aparente nas observáveis, sendo caracterizados também os desvanecimentos canônicos, perdas de ciclo, perdas de sincronismo e ambiguidades de meio ciclo. As lacunas (ou descontinuidades) nas observáveis GNSS conforme obtidas em arquivos RINEX de observação também foram discutidas, as quais podem estar associadas à cintilação ou às configurações (máscaras) internas que podem

ser aplicadas no receptor.

Foram avaliados aspectos sobre modelos que descrevem a variância das observáveis GNSS sob efeito de cintilação. Destaca-se que, em complemento às variâncias, valores obtidos por diferentes métricas permitem a descrição do cenário crítico para as observáveis de fase e pseudodistância em um determinado período.

Sem uma modelagem adequada, as observáveis sob influência de cintilação podem denegrir o posicionamento pelo GNSS. No Capítulo 4, a utilização dos modelos para a variância de rastreamento do sinal na mitigação dos efeitos da cintilação ionosférica no PPP é objeto de investigação. O desenvolvimento e a aplicação de uma nova metodologia para a mitigação dos efeitos da cintilação no PPP também estão incluídos no referido capítulo.

4 Mitigação dos Efeitos da Cintilação Ionosférica no PPP

As pesquisas relacionadas à mitigação de cintilação ionosférica no posicionamento GNSS tem caráter multidisciplinar, uma vez que estão relacionadas à climatologia das cintilações, arquitetura de receptores GNSS e modelos matemáticos envolvidos no ajustamento de observações nos métodos de posicionamento.

Algumas abordagens são destacadas na literatura para atenuar os efeitos da cintilação ionosférica nos métodos de posicionamento, incluindo aplicações no PPP e no RTK. Neste projeto, as investigações foram direcionadas no método PPP (ZUMBERGE et al., 1997) e suportadas pelo software RT-PPP (MARQUES, 2012; MARQUES et al., 2014). O PPP foi escolhido devido a possibilidade de se alcançar alta acurácia posicional (poucos centímetros) no posicionamento absoluto (único receptor) com dados GPS. O RT-PPP foi escolhido por ser um software científico, desenvolvido na FCT/UNESP e que proporciona suporte à realização de diversas pesquisas, além de proporcionar o serviço de PPP online da FCT/UNESP¹. Desta forma, pôde-se utilizar os dados das estações de monitoramento de cintilação da rede CIGALA/CALIBRA para direcionar as investigações acerca de abordagens de mitigação existentes, bem como o desenvolvimento de uma nova abordagem. Este processo foi conduzido pela avaliação de dados brutos, de índices de cintilação, de observáveis GNSS e de resultados proporcionados pelo PPP, como a acurácia posicional e resíduos do ajustamento.

De uma forma geral, duas abordagens figuram como principais alternativas para mitigação de cintilação ionosférica no posicionamento. Uma alternativa visa evitar a utilização das observáveis potencialmente degradadas pela cintilação, reduzindo assim o efeito das mesmas na solução posicional. No contexto deste tipo de abordagem, comparece o trabalho de Zhang, Guo e Zhou (2014), no qual um controle de qualidade aplicado às observáveis rejeita aquelas que não atendem um critério estabelecido. As observáveis rejeitadas sequer entram no ajustamento e não contribuem na determinação da posição. Qualquer abordagem para evitar (ou excluir) observáveis tem potencial para mitigar os efeitos da cintilação no posicionamento. Contudo, a efetividade destas abordagens fica restrita à geometria de satélites e a importância das observáveis excluídas para a determinação da posição. No escopo deste projeto, as abordagens baseadas na edição ou exclusão de observáveis antes do ajustamento não foram objeto de investigação, uma vez que se tem o interesse de modelar os efeitos da cintilação que incorrem sobre elas.

Outro tipo de abordagem para mitigação destacado na literatura visa modificar o

¹ Acessível em <<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/>>, acesso em 01 Mar. 2018.

modelo estocástico adotado. Nesta abordagem, utilizam-se informações que descrevem o efeito da cintilação nas observáveis GNSS para atribuir variância adequada em observáveis degradadas. Este tipo de abordagem será discutido no contexto da seção 4.1 – que remete à configuração dos modelos funcional e estocástico para o PPP sob diferentes perspectivas, incluindo o PPP padrão (sem mitigação) e o modelo com mitigação.

4.1 Modelo funcional e estocástico no PPP

Várias configurações podem ser utilizadas para processamento no modo PPP, como a utilização de diferentes observáveis (alternando entre pseudodistância ou fase, simples ou dupla frequência, por exemplo), utilização de diferentes estratégias para modelar os efeitos da refração troposférica² e ionosférica, bem como a utilização de diferentes tipos de órbitas e correções para os relógios dos satélites.

Além destas configurações presentes na maioria dos softwares de PPP, adiciona-se também a possibilidade de modelagem dos efeitos da cintilação ionosférica. A seguir, são apresentadas as configurações acerca dos modelos funcional e estocástico utilizados nas investigações.

4.1.1 Modelo funcional no PPP padrão

Neste trabalho, o PPP foi utilizado com as observáveis de pseudodistância e fase, nas portadoras L1 e L2. A observável de pseudodistância (PD) na portadora $L_i = L1, L2$ (em metros) entre um satélite s e um receptor r em uma determinada época t pode ser expressa pela seguinte equação (HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$PD_{L_{ir}}^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] + I_{L_{ir}}^s(t) + T_r^s(t) + d\epsilon_{PD_r}^s(t) + \epsilon_{PD_{L_{ir}}}^s \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1, tem-se:

- ρ_r^s é a distância geométrica satélite-receptor no instante de recepção do sinal;
- c é a velocidade de propagação ($c = 299792458$ m/s);
- dt_r e dt^s indicam o erro do relógio do receptor e do satélite em relação ao sistema de tempo do GPS, ambos expressos em segundos;

² A refração troposférica é caracterizada pelo atraso na propagação do sinal GNSS ao se propagar pela troposfera (camada da atmosfera terrestre que se estende da superfície até aproximadamente 50 km de altitude). Para as bandas utilizadas pelo GNSS, a troposfera é um meio não dispersivo, isto é, a refração não depende da frequência do sinal GNSS (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

- $I_{L_{ir}}^s$ e T_r^s são os termos que descrevem a refração atmosférica (a qual é subdivida em duas componentes – troposfera T_r^s e ionosfera $I_{L_{ir}}^s$);
- $d\epsilon_{PD_r}^s$ agrupa demais erros sistemáticos de menor magnitude que são modelados no PPP (marés terrestres, carga oceânica, atrasos de hardware e variações de centro de fase de antenas);
- $\epsilon_{PD_{L_{ir}}^s}$ representa os efeitos sistemáticos não modelados e erros aleatórios na pseudo-distância.

Já a observável de fase (ϕ , em unidades de ciclos), multiplicada pelo seu comprimento de onda para obtenção do respectivo valor em metros, pode ser escrita como:

$$\lambda_{L_i} \phi_{L_{ir}}^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] - I_{L_{ir}}^s(t) + T_r^s(t) + \lambda_{L_i} N_i + d\epsilon_{\phi_r}^s(t) + \epsilon_{\phi_{L_{ir}}^s} \quad (4.2)$$

onde λ_{L_i} é o comprimento de onda da portadora L_i , N_i é a ambiguidade da fase, $d\epsilon_{\phi_r}^s$ agrupa demais erros sistemáticos de menor magnitude que são modelados no PPP (fase *wind-up*, marés terrestres, carga oceânica, atrasos de hardware e variações de centro de fase de antenas) e os outros termos são similares aos apresentados na Equação 4.1.

Uma combinação linear entre as observáveis nas frequências L1 e L2 pode ser aplicada para eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Tal combinação é denominada *ion-free* e consiste na aplicação de coeficientes pré-definidos m_1 e m_2 de forma que:

$$m_1 I_{L_1}^s(t) + m_2 I_{L_2}^s(t) = 0 \quad (4.3)$$

Usualmente, uma outra condição é estabelecida, a qual visa manter o comprimento de onda da combinação *ion-free* igual ao comprimento de onda da portadora L1 (GOAD, 1996; MONICO, 2008):

$$m_1 f_1 + m_2 f_2 = f_1 \quad (4.4)$$

Com base nestas condições, obtém-se os seguintes coeficientes para pseudodistância e fase:

$$\begin{aligned} m_{1PD} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \approx 2,5457 \\ m_{2PD} &= -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \approx -1,5457 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
m_{1\phi} &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \approx 2,5457 \\
m_{2\phi} &= -\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \approx -1,9837
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Ao aplicar os coeficientes obtidos sobre as observáveis, obtém-se as observáveis da combinação linear *ion-free*, as quais são indicadas pelo subscrito “*IF*”:

$$PD_{IFr}^s(t) = (m_{1PD})PD_{L1r}^s(t) + (m_{2PD})PD_{L2r}^s(t) \tag{4.7}$$

$$\lambda_{IF}\phi_{IFr}^s(t) = (m_{1\phi})\phi_{L1r}^s(t) + (m_{2\phi})\phi_{L2r}^s(t) \tag{4.8}$$

Finalmente, as observáveis de pseudodistância e fase livres dos efeitos de primeira ordem da ionosfera podem ser escritas como:

$$PD_{IFr}^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] + T_r^s(t) + d\epsilon_{PD_{IFr}^s}(t) + \varepsilon_{PD_{IFr}^s} \tag{4.9}$$

$$\lambda_{IF}\phi_{IFr}^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] + T_r^s(t) + \lambda_{IF}N_{IF} + d\epsilon_{\phi_{IFr}^s}(t) + \varepsilon_{\phi_{IFr}^s} \tag{4.10}$$

As Eqs. 4.9 e 4.10 representam as observáveis utilizadas no PPP padrão, no qual não há modificação explícita para modelar os efeitos da cintilação ionosférica.

4.1.2 Modelo estocástico no PPP padrão

Para a determinação da variância das observações no PPP padrão, duas estratégias distintas são comumente adotadas. A primeira consiste em admitir que cada tipo de observável (*obs*) tem variância nominal constante (σ_{obs}^2). A segunda consiste em ponderar cada observável considerando sua variância nominal e também o ângulo de elevação do satélite ($\sigma_{obs,E}^2$).

Para o modelo de variância constante, no software RT-PPP, por exemplo, os seguintes valores são sugeridos para a precisão das observáveis não-diferenciadas (em metros), podendo ser alterados a critério do usuário: $\sigma_{PD_{L1}} = 0,8$; $\sigma_{PD_{L2}} = 1,0$; $\sigma_{\phi_{L1}} = 0,008$ e $\sigma_{\phi_{L2}} = 0,01$. Para o modelo que leva em consideração também o ângulo de elevação do satélite, a seguinte função pode ser utilizada (MARQUES, 2013):

$$\sigma_{obs,E}^2 = \frac{1}{\sin(E)} \sigma_{obs}^2 \tag{4.11}$$

O modelo estocástico baseado no ângulo de elevação pode oferecer um cenário mais realístico, uma vez que as observações provenientes de ângulos de elevação mais

baixos estão sujeitas a maior incidência de refração atmosférica, além da suscetibilidade à multicaminhamento dos sinais.

Ressalta-se que para o caso de utilização de observável da combinação *ion-free*, é necessário realizar a propagação de variância e covariância (MARQUES, 2012). Para as observáveis de pseudodistância e fase, respectivamente, tem-se:

$$\sigma_{PD_{IF}}^2 = m_{1PD}^2 \cdot \sigma_{PD_{L1}}^2 + m_{2PD}^2 \cdot \sigma_{PD_{L2}}^2 \quad (4.12)$$

$$\sigma_{\phi_{IF}}^2 = m_{1\phi}^2 \cdot \sigma_{\phi_{L1}}^2 + m_{2\phi}^2 \cdot \sigma_{\phi_{L2}}^2 \quad (4.13)$$

Normalmente, admite-se que as observáveis são estatisticamente independentes, ou seja, a matriz de variância e covariância (MVC) das observações é diagonal (AQUINO et al., 2009; MARQUES, 2012). Considerando a utilização de observáveis de pseudodistância e fase no PPP, tem-se a seguinte MVC:

$$\Sigma_{obs} = \begin{bmatrix} \sigma_{PD_{IF}^{S_1}}^2 & \cdots & & \cdots & 0 \\ \vdots & \sigma_{PD_{IF}^{S_2}}^2 & & & \vdots \\ & & \ddots & & \\ & & & \sigma_{PD_{IF}^{S_n}}^2 & \\ & & & \sigma_{\phi_{IF}^{S_1}}^2 & \\ & & & & \sigma_{\phi_{IF}^{S_2}}^2 \\ \vdots & & & & & \ddots \\ 0 & \cdots & & & \cdots & \sigma_{\phi_{IF}^{S_n}}^2 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

onde os sobrescritos $S = 1, 2, \dots, n$ referem-se aos satélites disponíveis para a realização do PPP.

4.1.3 Modelo estocástico no PPP em abordagens de mitigação existentes

Nas abordagens de mitigação de cintilação ionosférica descritas na literatura, as variâncias das observáveis são definidas levando-se em consideração o efeito das cintilações sobre as mesmas, conforme obtido por algum modelo de variância de erro de rastreamento. Esta estratégia é apresentada por Aquino et al. (2009), onde o modelo estocástico das observáveis GPS foi definido de acordo com os valores de saída obtidos pelo modelo de Conker (vide seção 3.2). Para os casos de posicionamento absoluto, considerou-se também as observáveis estatisticamente independentes (MVC das observações diagonal, assim como em Aquino et al. (2009)). Logo, considerando as diferentes observáveis cuja variância é

definida no modelo de Conker ($obs = \{PD_{L1(C/A)}, PD_{L2/P(Y)}, \phi_{L1(C/A)}, \phi_{L2/P(Y)}\}$), a MVC passa a ser escrita como:

$$\Sigma_{obs} = \begin{bmatrix} f_{Conker}(obs^{S_1}) & \dots & 0 \\ \vdots & f_{Conker}(obs^{S_2}) & \\ & \ddots & \\ 0 & & f_{Conker}(obs^{S_n}) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

onde f_{Conker} é a função que define a variância da observável de acordo com o modelo de Conker.

Os resultados obtidos por Aquino et al. (2009) foram satisfatórios, e demonstraram melhorias na acurácia do posicionamento sob condições de cintilação ionosférica. Como cada *link* satélite-receptor pode ser afetado de maneira única pelas cintilações no caminho de propagação do sinal, utilizar um modelo que descreve as variâncias das observáveis oferece um cenário mais realístico ao ajustamento. Esta abordagem também foi aplicada em diferentes configurações de processamento em Silva et al. (2010), onde os resultados demonstraram que a abordagem permite a obtenção de melhores resultados quando comparados a estratégias convencionais, como as descritas na subseção 4.1.2. Nenhuma modificação no modelo funcional dos diferentes métodos de posicionamento utilizados foi realizada.

Embora não esteja especificado claramente nestes trabalhos, a taxa de observação de 60 segundos está implícita na utilização do índice S4 no modelo de Conker, bem como na determinação dos parâmetros espectrais p e T que também são utilizados pelo modelo. Observa-se a limitação para a aplicação em outros intervalos de observação, como 1s ou 15s, situações em que alguma abordagem de interpolação ou reamostragem seria requerida para tornar o modelo compatível. Em resultados apresentados em Park et al. (2017), os quais foram conduzidos no escopo do Projeto CALIBRA, a variação do modelo de Conker (Conker') foi utilizada para tentar superar a limitação da taxa de amostragem e outras limitações do modelo original (conforme foi discutido na seção 3.2). Neste caso, o índice S4 foi calculado a cada segundo, assim como a razão sinal-ruído. O desempenho desta abordagem foi verificado em testes comparativos no RTK, onde a modelagem estocástica padrão foi comparada à modelagem com mitigação (variâncias obtidas pelo modelo Conker'). No entanto, comparece ainda a limitação devido ao uso de parâmetros espectrais p e T , os quais são estimados a partir da fase filtrada do sinal e sensíveis à perdas de sincronismo.

Até o presente momento, nenhuma aplicação do modelo de Conker estendido baseado na distribuição α - μ foi encontrada na literatura. Apresenta-se, na 4.1.4, resultados obtidos por este modelo no PPP com mitigação, fazendo-se um comparativo com a

modelagem estocástica padrão e com o modelo de Conker.

4.1.4 Aplicação dos modelos Conker e α - μ no PPP com mitigação

Um experimento foi realizado com dados da estação SJCU (São José dos Campos/SP) para avaliar a utilização do modelo baseado na distribuição α - μ (MORAES et al., 2014) no PPP, comparando-se os resultados com o modelo de Conker e o modelo padrão (sem mitigação). Foram processados dados coletados nos dez primeiros dias de Novembro de 2014. Tal período foi escolhido devido à quantidade suficiente de satélites transmitindo o sinal L2C simultaneamente, permitindo assim, estimar o índice S4 (e demais parâmetros necessários) na portadora L2 (conforme a disponibilidade de dados do receptor PolaRxS apresentada no Quadro 2.1, os dados 50 Hz na portadora L2 estão disponíveis apenas para os satélites transmitindo o sinal L2C). Destaca-se também a ocorrência de cintilações em diferentes níveis de severidade no período.

Para cada dia, foram processados dados coletados entre as 19:00 e 21:00 (no tempo local, UT-3). Três configurações para a modelagem estocástica do PPP foram comparadas. A primeira consiste na modelagem baseada na variância nominal das observáveis e ângulo de elevação (Equação 4.11); a segunda consiste na utilização do modelo de Conker; e a terceira consiste na utilização do modelo estendido baseado na distribuição α - μ .

As demais configurações para o processamento PPP foram idênticas nos três tipos de processamento. O atraso troposférico foi corrigido pelo modelo proveniente do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com a função de mapeamento denominada *Vienna Mapping Function* (VMF)³ (BOEHM; SCHUH, 2004). Foi aplicada uma máscara de elevação de 10°, valor adotado para evitar possíveis efeitos de multicaminhamento do sinal sem comprometer significativamente a geometria de cobertura de satélites.

Os dados de observação foram processados no modo cinemático. Neste modo, as coordenadas da estação são estimadas época-por-época, mas as ambiguidades são estimadas em um processamento iterativo. Se uma perda de ciclo for identificada (pelo algoritmo definido em Blewitt (1990)), o parâmetro de ambiguidade é reinicializado (MARQUES et al., 2014). Configurações adicionais padrão do RT-PPP foram mantidas, como as correções para: variação do centro de fase das antenas; marés terrestres; carga oceânica; atrasos de hardware e efeitos relativísticos (MARQUES et al., 2014). Com estas configurações, o PPP proporciona acurácia centimétrica após um período inicial de convergência (intervalo de tempo requerido para os componentes de coordenadas convergirem para um nível

³ Embora o RT-PPP disponha de uma configuração para estimar o atraso troposférico, esta opção não foi utilizada, uma vez que a adição de mais uma incógnita demandaria um aumento do número de satélites requerido para realizar o PPP; como o processamento foi feito considerando uma constelação limitada (apenas satélites transmitindo o sinal L2C), esta opção não foi utilizada.

centimétrico) (GAO; SHEN, 2002). Tipicamente, este período de convergência varia entre 10 e 20 minutos (aproximadamente) no RT-PPP.

De acordo com a definição de variâncias nos modelos de Conker e α - μ , foram processadas observáveis de fase ($\phi_{L1(C/A)}$, $\phi_{L2/P(Y)}$) e de pseudodistância ($PD_{L1(C/A)}$, $PD_{L2/P(Y)}$). Estas observáveis foram obtidas nos arquivos RINEX de observação com taxa de amostragem de 15 segundos. De maneira semelhante à estratégia adotada em Park et al. (2017), o índice S4 e a razão sinal-ruído foram estimados a cada 15 segundos, visando tornar suscetível a aplicação dos modelos em taxas de amostragem diferentes de 60 segundos. Os parâmetros espectrais p e T utilizados foram obtidos no arquivo “.ismr” padrão. Logo, cada estimativa dos índices espectrais foi empregada no cálculo de quatro variâncias no minuto a que se referem.

Os coeficientes de desvanecimento α e μ também foram estimados a cada 15 segundos. Considerando a amostragem de 50 Hz dos dados de intensidade, verifica-se que a cada intervalo de 15 segundos tem-se $15s \times 50Hz = 750$ amostras de intensidade. Esta quantidade é suficiente para proceder à determinação iterativa via software R dos parâmetros α e μ pelo método *fitdistr*.

Considerando a disponibilidade de dados brutos (apresentada no Quadro 2.1), observa-se que é possível estimar S4(L2) apenas para os satélites transmitindo o sinal L2C. Logo, admite-se nos testes que $S4(L2C) = S4(L2/P(Y))$. Embora a frequência L2 seja comum aos códigos L2C e L2/P(Y), os dois códigos são rastreados de maneira independente no receptor. Este aspecto faz com que as perdas de sincronismo em L2C não impliquem em perdas de sincronismo em L2/(P(Y), e vice-versa. Logo, verifica-se, nestes testes, a presença de um problema de disponibilidade na estimativa das variâncias para as observáveis L2/P(Y) para os casos em que houve perda de sincronismo em L2C, mas não em L2/P(Y). Ressalta-se também que em casos de perdas de sincronismo, ocorre a indisponibilidade dos parâmetros p e T (os quais são baseados na fase filtrada do sinal) por períodos que podem chegar a aproximadamente quatro minutos, levando também à indisponibilidade do cálculo da variância pelos modelos nestes casos.

Para os casos em que a variância dos modelos não pôde ser calculada, adotou-se a variância pelo ângulo de elevação (Equação 4.11), estratégia utilizada por Marques (2013). O Quadro 4.1 sumariza a quantidade absoluta e relativa de épocas em que a variância pelos modelos de Conker e α - μ apresentaram indisponibilidade. Para contextualizar, também são apresentadas as quantidades aproximadas de observáveis faltantes no arquivo RINEX de observação, seja devido a perdas de sincronismo ou a ambiguidades *half-cycle*, além do número de casos de cintilação significativa ($S4 > 0.3$). Observa-se que o modelo α - μ garante maior disponibilidade de variâncias se comparado ao modelo de Conker. Verifica-se também que a indisponibilidade aumenta com os casos de cintilação e lacunas nas observáveis. Por exemplo, no dia 06 de Novembro de 2014 (DOY 310/2014), verifica-se

uma indisponibilidade de quase 20% no total de variâncias estimadas pelo modelo $\alpha\text{-}\mu$. Este aspecto se deve principalmente às perdas de sincronismo, as quais afetaram as estimativas dos parâmetros p e T baseados na fase filtrada do sinal.

DOY / 2014	Cintilação		Nº aprox. de obs. faltantes no RINEX (15s)				Nº de Variâncias Indisponíveis			
	Nº de S4>0.3		Perda de Sincronismo		Ambiguidade half-cycle		Conker		Alpha-Mu	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	Absoluto	Relativo	Absoluto	Relativo
305	75	86	0	3	7	7	224	7.9%	80	2.8%
306	0	2	0	0	0	0	0	0.0%	0	0.0%
307	85	92	1	24	50	37	438	15.5%	280	9.9%
308	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	0	0.0%
309	20	19	3	8	22	19	294	10.4%	281	10.0%
310	217	264	3	25	113	103	807	28.6%	562	19.9%
311	49	53	0	15	21	7	439	15.6%	345	12.3%
312	33	37	0	6	7	1	255	9.0%	208	7.4%
313	87	90	0	34	48	20	619	22.0%	361	12.8%
314	0	0	0	0	0	0	32	1.1%	32	1.1%

Quadro 4.1 – Quantidade de variâncias faltantes pelos modelos de Conker e $\alpha\text{-}\mu$. Dados da estação SJCUI do período de 1 a 10 de Novembro de 2014, período das 19:00 às 21:00 (UT-3).

Para avaliação dos resultados do PPP, a acurácia do posicionamento GNSS pode ser analisada ao se comparar as coordenadas de referência das estações com as coordenadas obtidas no processamento PPP em cada época, além da avaliação da precisão das estimativas. Como o GNSS proporciona coordenadas geocêntricas (em relação ao centro de massa da Terra), é conveniente realizar uma transformação de referencial para poder avaliar as coordenadas obtidas em termos de componentes horizontal e vertical. Normalmente, realiza-se uma transformação para um Sistema Geodésico Local (SGL) – um sistema de referência com origem no ponto P de coordenadas conhecidas da estação, descrito em componentes Norte (N), Leste (E) e vertical (U) (MONICO, 2008). Pode-se avaliar a raiz do erro-médio-quadrático da solução tridimensional (*REMQ-3D*), definida por:

$$REMQ\text{-}3D(t) = \sqrt{DN^2 + DE^2 + DU^2} \quad (4.16)$$

onde DN , DE e DU são as discrepâncias entre as coordenadas de referência e as coordenadas obtidas pelo PPP na época t nos componentes Norte, Leste e Vertical, respectivamente, considerando o SGL. De maneira similar, pode-se também avaliar a precisão da solução tridimensional, definida por:

$$\sigma\text{-}3D(t) = \sqrt{\sigma N^2 + \sigma E^2 + \sigma U^2} \quad (4.17)$$

onde σN , σE e σU são as precisões esperadas das estimativas de coordenadas nas componentes Norte, Leste e Vertical, respectivamente, conforme obtidas no processamento

do PPP pela propagação da MVC dos parâmetros ajustados (considerando apenas os parâmetros referentes às coordenadas da estação).

Para não considerar o período de convergência em avaliações da acurácia posicional do PPP, as estatísticas de *REMQ-3D* foram analisadas no período entre 19:30 e 21:00 (isto é, o período inicial e conservador de 30 minutos onde comparece a convergência não foi considerado nas avaliações de acurácia posicional).

Os resultados numéricos do processamento são apresentados no Quadro 4.2. Para cada dia, são apresentadas as estatísticas de *REMQ-3D* (após o período de convergência) para cada modelagem estocástica utilizada no PPP. O número de casos de $S4 > 0,3$ também é apresentado para contextualizar a ocorrência de cintilações, além do número de perda de ciclos (e consequentemente, o número de reinicializações de ambiguidade) identificadas pelo RT-PPP.

Exemplos gráficos para dois dias selecionados são apresentados na sequência – são os dias 03 de Novembro de 2014 (DOY 307/2014) e 07 de Novembro de 2014 (DOY 311/2014). Nas Figs. 25 e 26, os valores de índice S4 referentes aos satélites utilizados no PPP são apresentados para estes dois dias.

Na Figura 27, são apresentados os resultados do PPP para o dia 307/2014. Observa-se que com a modelagem estocástica padrão os resultados são melhores (se comparados às demais modelagens) no período inicial (até aproximadamente às 20:00) caracterizado pela ausência de perdas de ciclo. Os resultados permitem inferir que os modelos de Conker e $\alpha\text{-}\mu$ induziram um efeito sistemático nas coordenadas. No entanto, no final do processamento (próximo às 21:45), os resultados obtidos permitem inferir que os modelos de variância proporcionaram coordenadas mais estáveis se comparados à modelagem padrão. Uma avaliação da precisão esperada das estimativas (conforme obtida na MVC dos parâmetros ajustados) é apresentada na Figura 28. É possível verificar que as precisões proporcionadas pelo PPP, de uma forma geral, são otimistas após o período de convergência. Este aspecto fica ainda mais evidente para o caso dos modelos de Conker e $\alpha\text{-}\mu$, ou seja, os resultados indicam que ambos os modelos proporcionaram variâncias muito otimistas para as observáveis.

Na Figura 29, são apresentados os resultados do PPP para o dia 311/2014. Observa-se que com a modelagem estocástica padrão, discrepâncias de cerca de 5 metros foram observadas na solução (próximo das 20:30). É possível observar que tais erros comparecem após uma sucessão de perdas de ciclos e reinicializações de ambiguidade. Nestes casos, o modelo de Conker e o modelo $\alpha\text{-}\mu$ proporcionaram melhorias, uma vez que houve maior estabilidade nas coordenadas observadas ao longo do tempo. No entanto, nota-se a presença de um efeito sistemático induzido na solução de coordenadas.

DOY / 2014	Cintilação		Nº de Perda de Ciclos	Modelagem Estocástica Padrão		Modelagem Estocástica Conker		Modelagem Estocástica α - μ	
	Nº de S4>0.3			REM-Q3D (m)		REM-Q3D (m)		REM-Q3D (m)	
	L1	L2		D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média
305	75	86	38	0.174	0.355	0.336	0.754	0.309	0.744
306	0	2	3	0.177	0.416	0.237	0.991	0.226	1.166
307	85	92	75	0.220	0.398	0.223	0.716	0.156	1.206
308	0	0	1	0.192	0.377	0.236	0.778	0.233	0.846
309	20	19	30	0.064	0.235	0.236	1.504	0.217	1.462
310	217	264	98	0.657	1.046	0.921	1.866	0.221	1.138
311	49	53	34	1.363	1.567	0.169	0.917	0.176	0.810
312	33	37	26	0.116	0.258	0.357	1.148	0.370	1.200
313	87	90	77	0.151	0.208	0.610	1.124	0.554	1.190
314	0	0	1	0.079	0.197	0.519	1.283	0.500	1.314

Quadro 4.2 – Resultados numéricos do processamento de dados da estação SJCÚ – Novembro/2014.

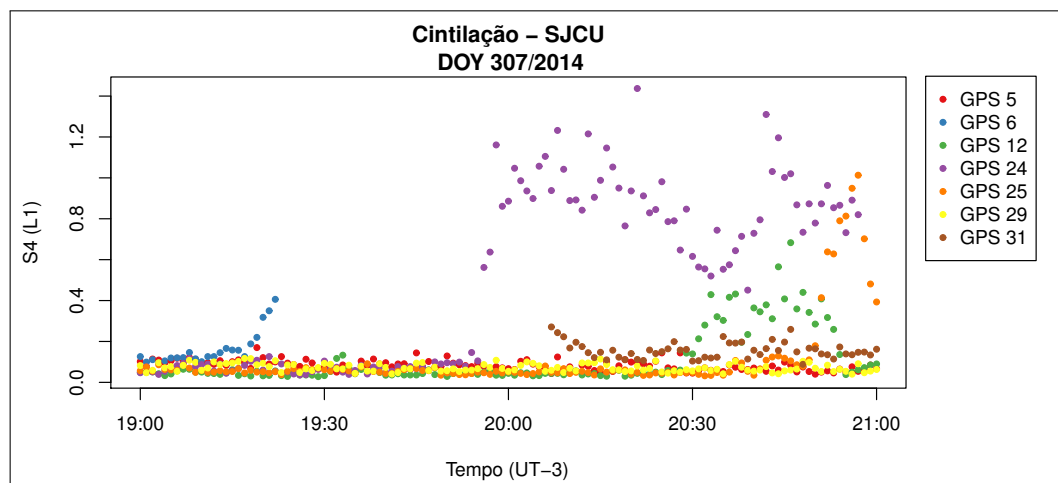


Figura 25 – Cintilação observada na estação SJCÚ considerando apenas os satélites utilizados no PPP – dados do dia 307/2014.

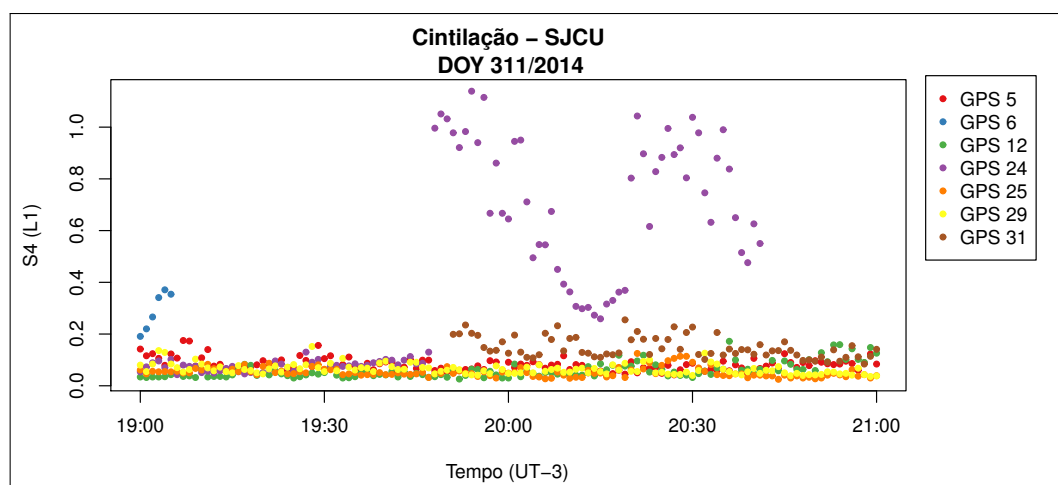
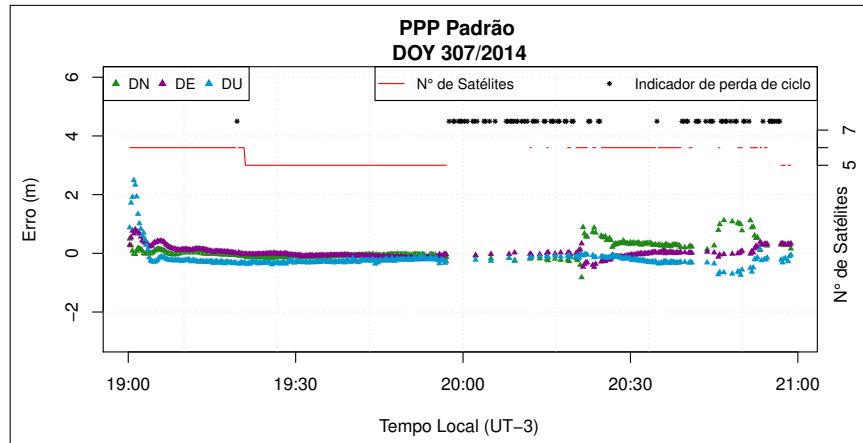
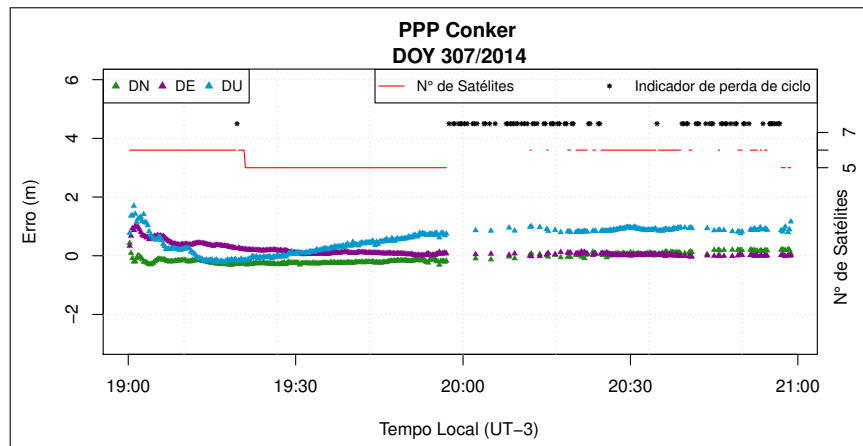


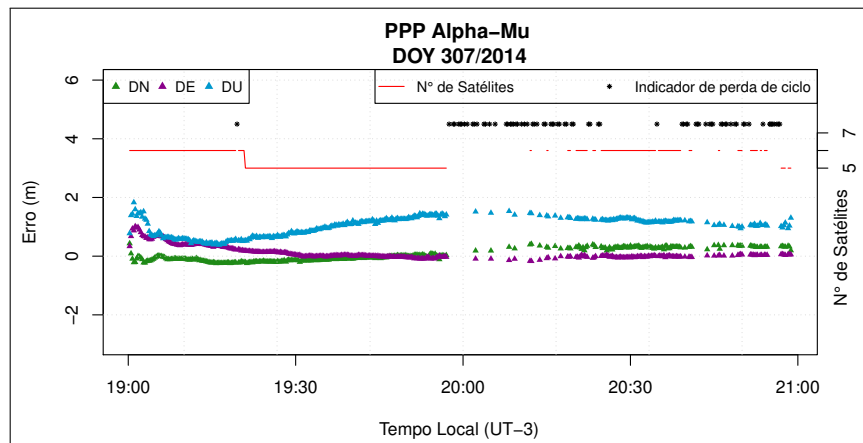
Figura 26 – Cintilação observada na estação SJCÚ considerando apenas os satélites utilizados no PPP – dados do dia 311/2014.



(a)

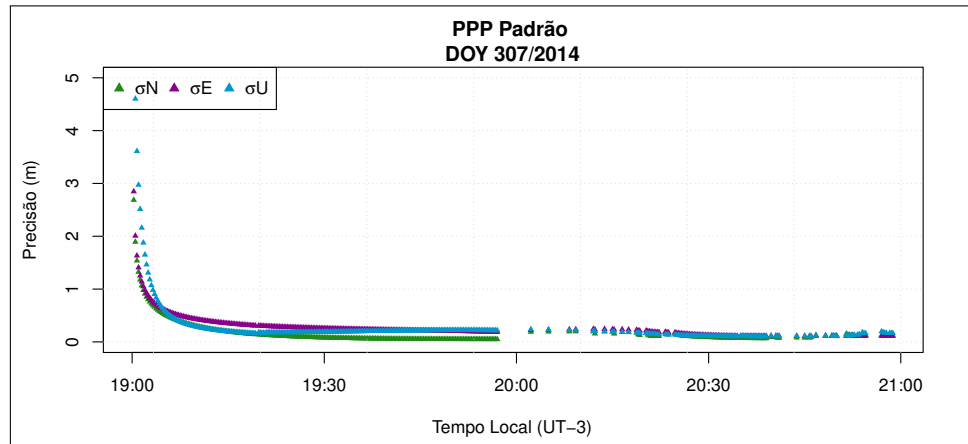


(b)

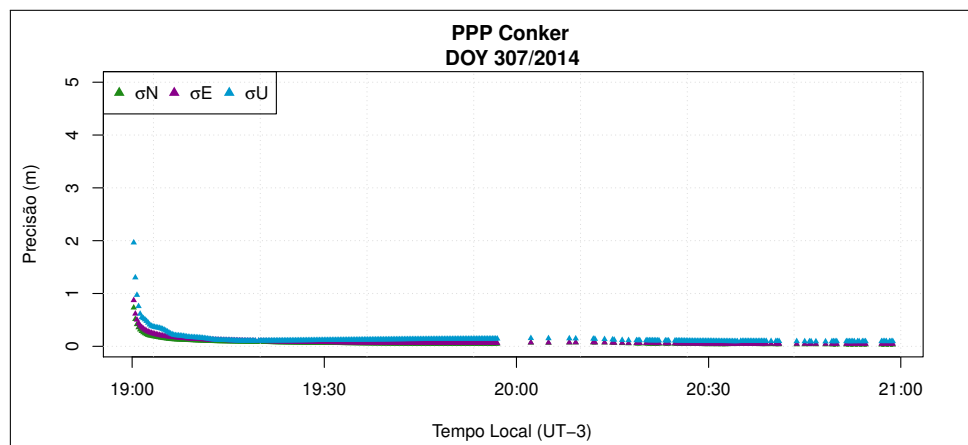


(c)

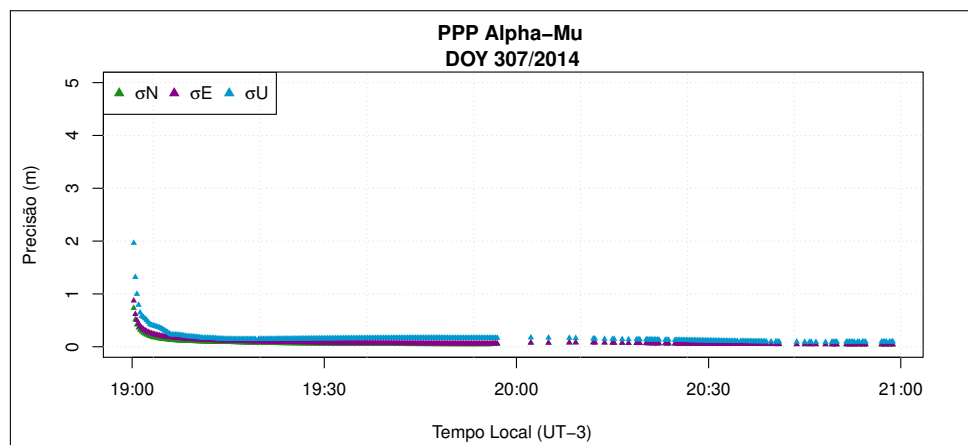
Figura 27 – Comparação entre o PPP com diferentes modelagens estocásticas: (a) padrão, (b) modelo de Conker e (c) modelo α - μ . Resultados para o dia 307/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.



(a)

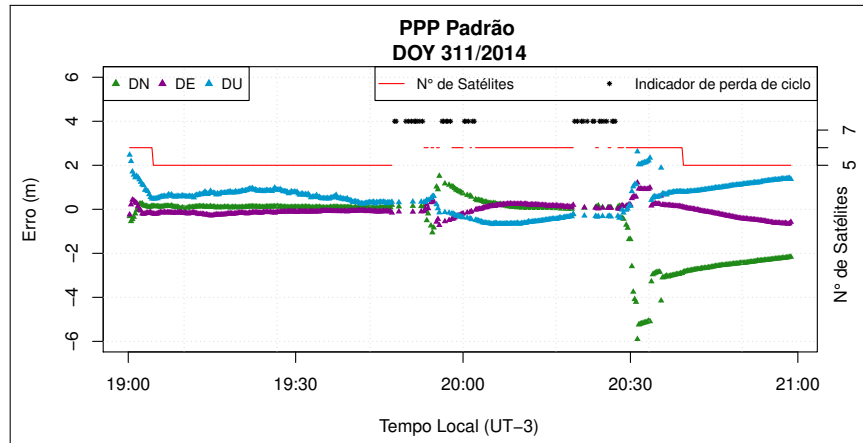


(b)

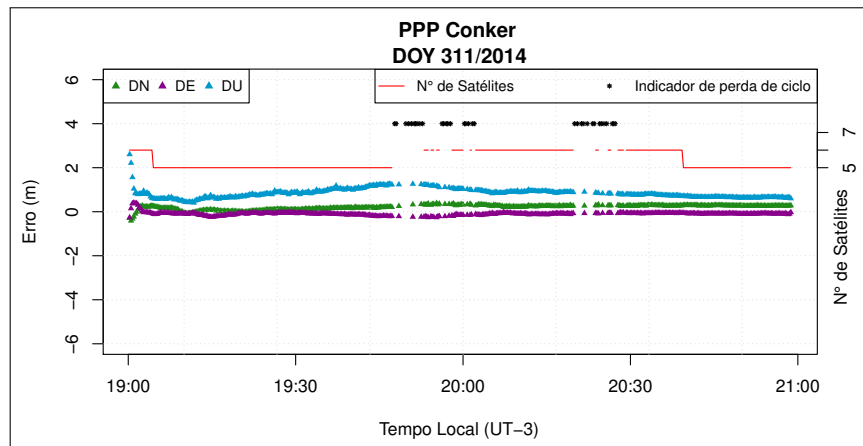


(c)

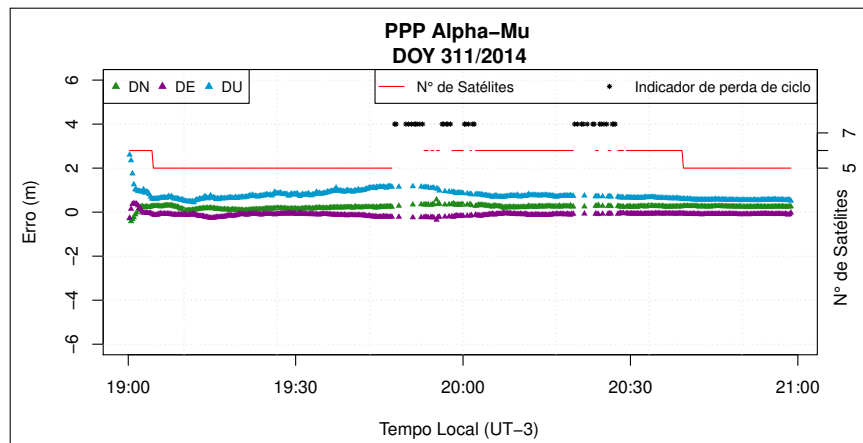
Figura 28 – Comparação da precisão do PPP com diferentes modelagens estocásticas: (a) padrão, (b) modelo de Conker e (c) modelo α - μ . Resultados para o dia 307/2014 – estação SJC. A precisão dos componentes é representada considerando um SGL.



(a)



(b)



(c)

Figura 29 – Comparação entre o PPP com diferentes modelagens estocásticas: (a) padrão, (b) modelo de Conker e (c) modelo α - μ . Resultados para o dia 311/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.

4.2 Método de mitigação proposto

Nos trabalhos anteriores mencionados (Aquino et al. (2009), Silva et al. (2010), Park et al. (2017)), as melhorias no posicionamento foram consideráveis, mas ainda incapazes de recuperar a acurácia posicional proporcionada pelos diferentes métodos de posicionamento em condições de ausência de cintilação. Este aspecto, aliado com as limitações dos modelos de variância de erro de rastreamento – principalmente a dificuldade de se extrair parâmetros internos de diferentes tipos de receptores GNSS e as dificuldades impostas pela utilização de diferentes taxas de amostragem – motivou a proposta de uma nova abordagem para mitigação, a qual é apresentada nesta seção.

O método de mitigação proposto no escopo desta tese foi desenvolvido considerando os dados das estações de monitoramento (que são coletados de maneira estática). Aspectos adicionais para aplicações com dados cinemáticos são abordados nas discussões e conclusões (seção 4.4).

Tal método é dividido em três etapas. A primeira etapa consiste em um modelo funcional modificado, levando em consideração as degradações nas medidas de pseudodistância e fase causadas pelas cintilações (subseção 4.2.1). A segunda etapa consiste na modificação do modelo estocástico. No entanto, ao invés de utilizar um modelo de variância – como o de Conker, por exemplo – foram utilizadas as estimativas de primeira etapa para estimar a variância esperada das observáveis (subseção 4.2.2). Por fim, a terceira etapa consiste em uma estratégia para minimizar os casos de perdas de sincronismo satélite-receptor e as consequentes reinicializações de ambiguidades (subseção 4.2.3).

4.2.1 Modelo funcional proposto

No método proposto, um novo modelo funcional foi adotado, o qual inclui um componente para descrever os erros nas medidas de pseudodistância e fase devido à cintilação. Neste caso, as observações não-diferenciadas podem ser reescritas como:

$$PD_{L_i}^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] + I_{L_i}^s(t) + T_r^s(t) + d\epsilon_{PD_{L_i}^s}(t) + dScint_{PD_{L_i}^s}(t) + \epsilon_{PD_{L_i}^s} \quad (4.18)$$

$$\lambda_{L_i} \phi_{L_i}^s(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] - I_{L_i}^s(t) + T_r^s(t) + d\epsilon_{\phi_{L_i}^s}(t) + \lambda_{L_i} N_i + dScint_{\phi_{L_i}^s}(t) + \epsilon_{\phi_{L_i}^s} \quad (4.19)$$

onde os termos $dScint_{PD_{L_i}^s}$ e $dScint_{\phi_{L_i}^s}$ referem-se aos erros (em metros) causados pela cintilação nas observáveis de pseudodistância e fase na frequência L_i , respectivamente.

Diferentemente do efeito de primeira ordem da ionosfera, o termo $dScint$ não é cancelado na combinação *ion-free*. Desta forma, as observáveis da combinação *ion-free* podem ser reescritas como:

$$PD_{IF_r^s}(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] + T_r^s(t) + d\epsilon_{PD_{IF_r^s}}(t) + dScint_{PD_{IF_r^s}}(t) + \epsilon_{PD_{IF_r^s}} \quad (4.20)$$

$$\lambda_{IF}\phi_{IF_r^s}(t) = \rho_r^s(t) + c[dt_r(t) - dt^s(t)] + T_r^s(t) + \lambda_{IF}N_{IF} + d\epsilon_{\phi_{IF_r^s}}(t) + dScint_{\phi_{IF_r^s}}(t) + \epsilon_{\phi_{IF_r^s}} \quad (4.21)$$

Com este modelo, os efeitos causados pela cintilação nas observáveis são modelados também no modelo funcional. A estimativa dos valores de $dScint$ é feita época-por-época a partir dos dados brutos (50 Hz), o que permite aplicar o modelo em qualquer taxa de observação. O erro devido à cintilação nas observáveis GNSS está relacionado à severidade das cintilações e também à arquitetura do receptor (FORTE, 2012). O método proposto, sendo baseado em dados observados, não demanda parâmetros de configuração interna do receptor, tendo, portanto, potencial para ser aplicado em receptores de diferentes fabricantes.

Conforme a disponibilidade de dados brutos nos receptores da rede CIGALA/CALIBRA (apresentada no Quadro 2.1), foi possível realizar a estimativa de $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}$ e $dScint_{\phi_{L2C}}$. A estimativa de $dScint$ para as observáveis de pseudodistância (bem como de outras observáveis de fase baseadas em no código P, por exemplo) não pôde ser realizada devido à indisponibilidade de dados.

Para a estimativa de $dScint$ para as observáveis de fase, o referido termo foi dividido em dois componentes:

$$dScint_{\phi_{L_i}} = dScint_{\phi_{L_i}}^{HF} + dScint_{\phi_{L_i}}^{LF} \quad (4.22)$$

onde $dScint_{\phi_{L_i}}^{HF}$ e $dScint_{\phi_{L_i}}^{LF}$ referem-se, respectivamente, aos termos de flutuação de mais alta e mais baixa frequência do erro devido à cintilação na observável de fase, os quais foram estimados a partir da fase filtrada do sinal a 50 Hz. Após a filtragem da fase (pelo filtro Butterworth de 6ª ordem, com frequência de corte de 0,1 Hz), os dois componentes são separados em duas partes: o termo $dScint_{\phi_{L_i}}^{HF}$ representa o componente obtido pelo filtro passa-alta, enquanto $dScint_{\phi_{L_i}}^{LF}$ representa o componente obtido pelo filtro passa-baixa. Fisicamente, o componente $dScint_{\phi_{L_i}}^{HF}$ representa as flutuações rápidas devido à cintilação na fase do sinal, enquanto o componente $dScint_{\phi_{L_i}}^{LF}$ representa as flutuações de fase mais lentas (que ocorrem devido a variações no TEC ao longo do tempo, conforme reportado em Forte e Radicella (2002)). Ressalta-se que diferentes configurações podem ser aplicadas para estas estimativas.

Um exemplo de estimativa dos componentes $dScint$ com dados reais é apresentado na Figura 30. Neste exemplo, são apresentados os valores para $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}^{HF}$, $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}^{LF}$ e a soma entre ambos (Equação 4.22). A estimativa foi feita com dados da estação PRU2

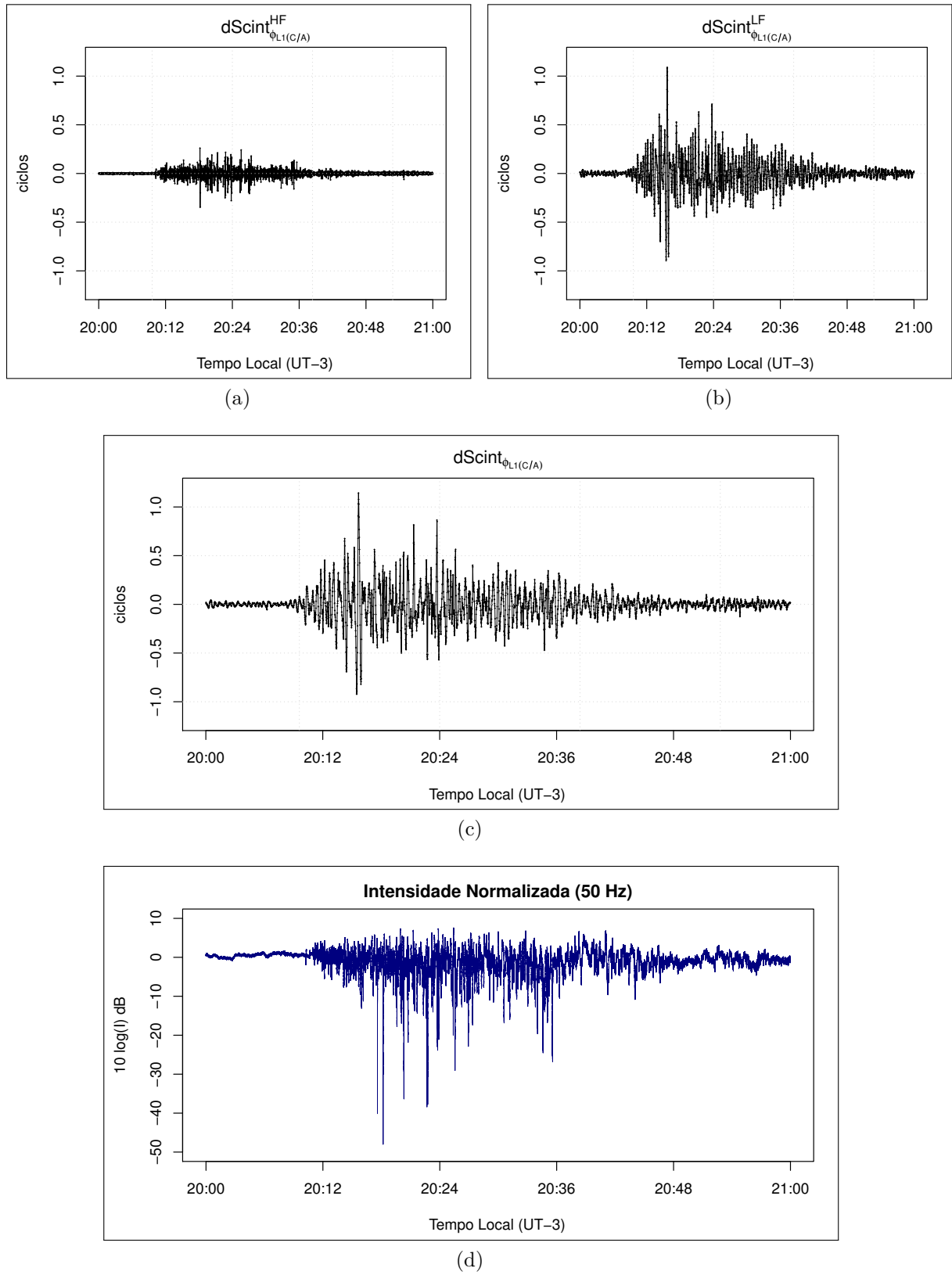


Figura 30 – Estimativa de $dScint_{\phi_{L1}(C/A)}$: (a) estimativa do componente de alta frequência; (b) estimativa do componente de baixa frequência; (c) estimativa final; (d) intensidade normalizada do sinal a 50 Hz.

(PRN 12) coletados no dia 03 de Novembro de 2014. Na Fig. 30d, a intensidade do sinal normalizada (a 50 Hz) é apresentada, evidenciando a presença de cintilações fortes.

Uma avaliação inicial da efetividade da correção do erro devido à cintilação pode ser obtida ao se comparar a observável de fase original (ϕ_{L_i}), conforme obtida no arquivo RINEX de observação, e a observável de fase corrigida do termo $dScint_{\phi_{L_i}}$ (aqui denominada ϕ'_{L_i}). A correção pode ser obtida pela seguinte relação:

$$\phi'_{L_i} = \phi_{L_i} - dScint_{\phi_{L_i}} \quad (4.23)$$

A Figura 31 apresenta um exemplo desta comparação utilizando o mesmo cenário da Figura 30. A tripla-diferença da fase e da fase corrigida ao longo do tempo são apresentadas. É possível observar que a versão da observável corrigida do termo $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}$ apresenta maior estabilidade ao longo do tempo.

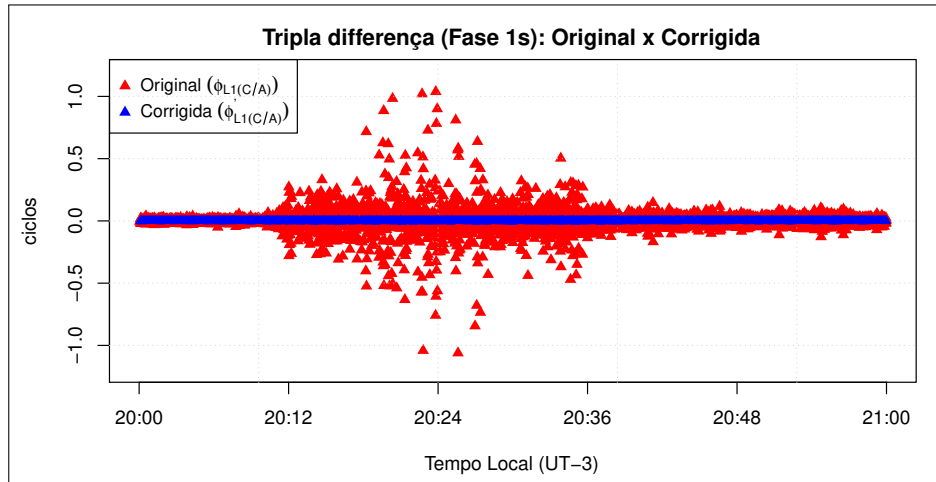


Figura 31 – Avaliação inicial da correção $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}$: observável original e observável corrigida.

4.2.2 Modelo estocástico proposto

Mesmo após a correção do termo $dScint$ no modelo funcional, erros remanescentes ainda incorrem sobre as observáveis. Desta forma, um novo modelo estocástico foi configurado com a finalidade de proporcionar um cenário mais realístico ao ajustamento.

O novo modelo estocástico apresenta um conceito similar à abordagem apresentada por Aquino et al. (2009) de se atribuir variâncias diferentes em cada *link* satélite-receptor. No entanto, ao invés da utilização de um modelo de variância de erro de rastreamento, aplica-se uma função de mapeamento sobre o valor de $dScint$. Tal função representa uma relação entre a magnitude do valor de $dScint$ e os potenciais erros remanescentes

na observável após a correção do mesmo no modelo funcional. A MVC das observáveis, diagonal como em trabalhos anteriores, passa a ser reescrita como:

$$\Sigma_{obs} = \begin{bmatrix} f(\sigma_{obs}^2, dScint_{obs^{s_1}}) & \dots & 0 \\ \vdots & f(\sigma_{obs}^2, dScint_{obs^{s_2}}) & \\ & & \ddots \\ 0 & & & f(\sigma_{obs}^2, dScint_{obs^{s_n}}) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Considerando a disponibilidade de dados brutos, uma função $f(\sigma_{\phi_{L_i}}^2, dScint_{\phi_{L_i}})$ foi definida para os receptores utilizados nos experimentos para as observáveis de fase da onda portadora $\phi_{L1(C/A)}$ e ϕ_{L2C} . A função visa associar o desvio-padrão nominal da observável ($\sigma_{\phi_{L_i}}$) e o erro $dScint_{\phi_{L_i}}$. Inicialmente, foi analisado o comportamento do componente $dScint_{\phi}$ durante desvanecimentos severos na intensidade do sinal. Com base nestas análises, foram verificados valores máximos de $dScint_{\phi} \approx 2,6$ ciclos. Na maioria dos casos acima deste valor, uma perda de sincronismo foi verificada, fazendo com que novos dados estivessem disponíveis somente após o período de reaquisição do sinal. A partir desta verificação, foram realizados experimentos no PPP aplicando-se diferentes funções associando o valor do $dScint_{\phi_{L_i}}$ com a variância da observável $\sigma_{\phi_{L_i}}^2$. A seguinte função foi definida a partir destes experimentos, a qual proporcionou um cenário mais realístico para as variâncias conforme aplicadas no PPP com mitigação:

$$\sigma_{\phi_{L_i}, dScint_{\phi_{L_i}}}(t) = \left(1 + \kappa |dScint_{\phi_{L_i}}(t)|^y\right) \cdot \sigma_{\phi_{L_i}} \quad (4.25)$$

Nos experimentos realizados, adotou-se $\kappa = 35$ e $y = 0.5$ para associar a magnitude dos erros remanescentes na observável de fase após a correção de $dScint_{\phi}$ no modelo funcional. Observa-se que a variância pode ser definida época-por-época acompanhando o valor de $|dScint_{\phi}|$, o que proporciona um modelo estocástico mais realístico em complemento ao modelo funcional. A Equação 4.25 pode então ser utilizada no modelo estocástico do PPP com mitigação.

A Figura 32 apresenta graficamente esta função. Observa-se que quanto maior o valor de $dScint_{\phi}$, maior o valor esperado do desvio-padrão da observável.

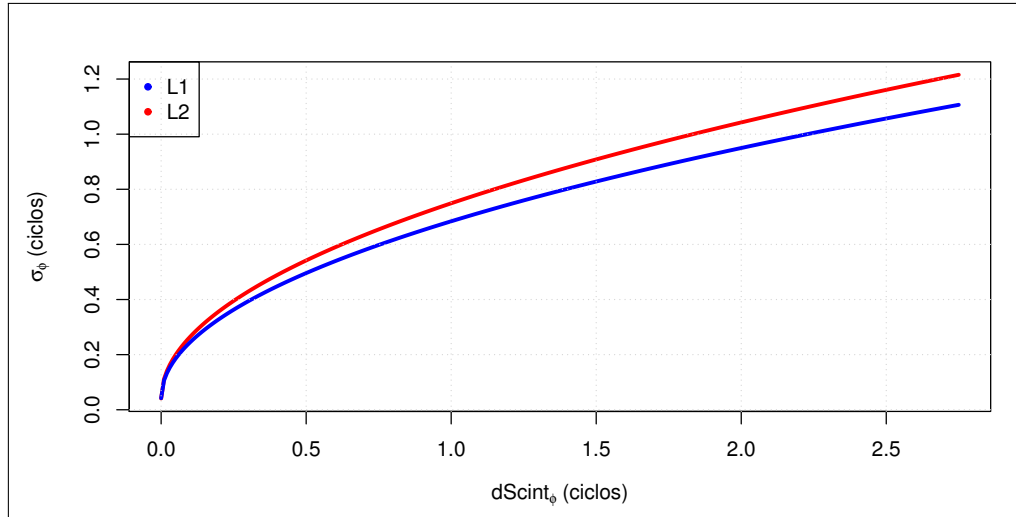


Figura 32 – Função de mapeamento para o desvio-padrão da fase de acordo com o valor de $dScint_{\phi_{L_i}}$.

4.2.3 Estratégia para minimizar os efeitos de perdas de sincronismo

No software RT-PPP o algoritmo para detecção de perdas de ciclo apresentado em Blewitt (1990) está implementado. Quando uma perda de ciclo é detectada pelo algoritmo, um novo parâmetro referente à ambiguidade da fase do satélite é inicializado no ajustamento (MARQUES et al., 2014). Ressalta-se que a utilização do algoritmo de Blewitt requer a configuração de certos limiares para declarar ou não uma perda de ciclo. A configuração de diferentes valores para tais limiares pode influenciar na performance do PPP, conforme discutido em Zhang, Guo e Zhou (2014). Nos testes realizados neste projeto, adotou-se os valores padrão do RT-PPP para tais limiares.

Além das perdas de ciclo, durante as cintilações fortes, muitas perdas de sincronismo satélite-receptor foram registradas nos dados dos receptores da rede CIGALA/CALIBRA. Diferentemente das perdas de ciclo, as quais causam a reinicialização do respectivo parâmetro de ambiguidade da fase apenas se detectadas pelo algoritmo de Blewitt, a perda de sincronismo certamente causa a reinicialização deste parâmetro após o período de reaquisição do sinal. Destaca-se que a ocorrência destas perdas pode variar conforme a versão do *firmware* do receptor e a severidade das cintilações. Neste trabalho, a utilização de uma estratégia para atenuar os efeitos das perdas de sincronismo no PPP também foi objeto de investigação.

Uma perda de sincronismo devido à ocorrência de cintilação indica que a incerteza no PLL do receptor chegou a um nível extremo, superando um limiar interno de aceitação para o rastreamento do sinal pelo receptor. Neste caso, o rastreamento é interrompido, sendo retomado somente após a completa reaquisição do sinal. Durante cintilações fortes, por vezes, este ciclo de perdas de sincronismo e reaquisições acontece sucessivamente, o

que causa prejuízo em métodos de posicionamento baseados na fase da onda portadora. Além disso, conforme destacado por Forte (2012), a suscetibilidade às perdas de ciclo no período de reaquisição do sinal é ainda maior.

Com base nestes aspectos, uma metodologia foi proposta para minimizar os efeitos das perdas de sincronismo baseada na vizinhança temporal da ocorrência das mesmas (considerando o caso de pós-processamento dos dados). Considerando uma época t de ocorrência de perda de sincronismo, a estratégia consiste em superestimar a variância da observável durante o período $[t - w, t + w]$ – onde w representa um período de tempo (em segundos) para descrever os instantes em que a observável de fase está mais suscetível a erros devido à cintilação. Ao utilizar esta estratégia, o efeito de sucessivas perdas de sincronismo (e consequentes reinicializações de ambiguidade e mudanças na geometria) pode ser minimizado. A Equação 4.25 pode ser utilizada para definir a variância da observável de fase, a qual passa a ser definida pelo seguinte critério condicional:

$$\sigma_{\phi_{L_i}, dScint}^2(t) = \begin{cases} \left[(1 + \kappa |dScint_{\phi_{L_i}}|^y) \cdot \sigma_{\phi_{L_i}} \right]^2, & \text{rastreamento mantido em } [t-w, t+w] \\ f_{max}(\sigma_{\phi_{L_i}}^2, dScint_{\phi_{L_i}}), & \text{perda de sincronismo em } [t-w, t+w] \end{cases} \quad (4.26)$$

onde $f_{max}()$ é uma função adotada para a maximização da variância, a qual tem como argumentos a variância nominal da observável e o valor do $dScint_{\phi}$. Nos experimentos cujos resultados serão apresentados na seção 4.3, adotou-se $w = 60$ segundos. Este valor foi definido empiricamente como uma forma de atenuar sucessivas perdas de sincronismo em intervalos curtos de tempo. Para a função de maximização, utilizou-se a própria função definida na Equação 4.25, mas com argumento fixado $dScint_{\phi} = 2,6$ ciclos – valor que representa a máxima variância para a observável na vizinhança temporal de uma perda de sincronismo.

O Quadro 4.3 apresenta um comparativo entre diferentes configurações de PPP considerando as estratégias descritas na literatura e a proposta neste trabalho. Considerando uma determinada observável GNSS (obs), tem-se:

Configuração do PPP	Modelo funcional	Modelo estocástico
Sem mitigação	obs	σ_{obs}^2 ou $f(\sigma_{obs}^2, E)$
Com mitigação (abordagens anteriores)	obs	$f_{modelo}(obs)$
Com mitigação (método proposto)	$obs-dScint_{obs}$	$f(\sigma_{obs}^2, dScint_{obs})$

Quadro 4.3 – Comparativo entre diferentes configurações de PPP no contexto de cintilação ionosférica.

4.3 Resultados do método proposto

Dados de observação (RINEX) das estações da rede CIGALA/CALIBRA foram processados com o software RT-PPP para a avaliação da abordagem propostas para

mitigação. O PPP padrão (sem mitigação de cintilação) foi comparado com o método proposto (com mitigação de cintilação). Destaca-se que, nos resultados apresentados, as três etapas do método de mitigação proposto foram utilizadas em conjunto. A aplicação das etapas individualmente foi objeto de testes, e, em resultados não apresentados, verificou-se a maior eficácia quando aplicadas as três etapas (isto é, modificações no modelo funcional, estocástico e estratégia para atenuar as perdas de sincronismo). Durante tais testes, verificou-se também que a maior contribuição para a mitigação dos efeitos da cintilação no PPP foi proveniente da modificação do modelo estocástico.

Para o PPP padrão, utilizou-se o modelo funcional apresentado nas Eqs. 4.9 e 4.10, bem como o modelo estocástico baseado no ângulo de elevação do satélite (Equação 4.11). Para o PPP no método proposto, utilizou-se o modelo funcional apresentado nas Eqs. 4.20 e 4.21, além do modelo funcional apresentado na Equação 4.26.

Conforme mencionado na subseção 4.2.1, devido à disponibilidade de dados brutos nos receptores da rede CIGALA/CALIBRA, foi possível realizar a estimativa de $dScint_{\phi_{L1(C/A)}}$ e $dScint_{\phi_{L2C}}$. Para a definição da variância das pseudodistâncias, adotou-se os valores de variância nominais sugeridos no RT-PPP.

As demais configurações do PPP foram idênticas para ambas as soluções. Foram utilizadas observáveis de pseudodistância e fase provenientes de códigos civis nas frequências L1 e L2 ($PD_{L1(C/A)}$, PD_{L2C} , $\phi_{L1(C/A)}$ e ϕ_{L2C})⁴. O atraso troposférico foi corrigido pelo modelo ECMWF com a função de mapeamento VMF (BOEHM; SCHUH, 2004).

Os dados de observação (com máscara de elevação de 10° e taxa de amostragem de 1 segundo) foram processados no modo cinemático (coordenadas da estação estimadas época-por-época e ambiguidades estimadas em um processamento iterativo). De maneira similar ao experimento apresentado na subseção 4.1.4, as demais configurações padrão no RT-PPP foram mantidas, como as correções para variação do centro de fase das antenas; marés terrestres; carga oceânica; atrasos de hardware e efeitos relativísticos (MARQUES et al., 2014). Com estas configurações, o PPP proporciona acurácia centimétrica após o período inicial de convergência. Para avaliação dos resultados, também foi analisada a acurácia posicional, sendo computadas estatísticas de $REMQ-3D$ e $\sigma-3D$ após o período de convergência.

4.3.1 Dados coletados em São José dos Campos/SP

Um conjunto de dados coletados durante o mês de Novembro/2014 na estação SJCUI foi processado para a avaliação do método proposto. Foram processadas janelas de dados com duração de duas horas cada (das 19:00 às 21:00 LT). O referido mês foi

⁴ Ressalta-se que não há distinção na nomenclatura das observáveis de fase provenientes por diferentes códigos (civis ou protegidos) no padrão RINEX v.2.xx. Logo, foi necessário realizar a leitura de observáveis no padrão RINEX v.3.03

escolhido por apresentar boa disponibilidade de dados e cenários de diferentes níveis de cintilação. A janela das 19:00-21:00 foi adotada por apresentar número de satélites suficiente transmitindo o sinal L2C (tipicamente de 5 a 7 satélites, simultaneamente). Mesmo com a constelação incompleta de satélites GPS transmitindo o sinal L2C neste período, os resultados de PPP na ausência de cintilação são condizentes com a acurácia esperada por este método. No entanto, os casos de perdas de sincronismo podem impor limitações à acurácia esperada no PPP caso afetem vários satélites simultaneamente e/ou não haja redundância no número de satélites requerido pelo PPP. Com as configurações utilizadas no RT-PPP, pelo menos cinco satélites são requeridos para se obter as estimativas de posição com redundância de observações.

Resultados diários compreendendo o período de todo o mês são apresentados na Figura 33. Os gráficos apresentam um comparativo entre a solução da abordagem padrão e a abordagem com mitigação. São apresentadas a média (Fig. 39a) e o desvio-padrão (Fig. 39b) do *REMQ-3D* (após o período de convergência) nas barras verticais. As linhas tracejadas indicam a quantidade de perda de ciclos, conforme identificadas pelo RT-PPP. É possível observar que os resultados obtidos pelo método proposto podem ser considerados promissores. Aspectos adicionais e limitações serão discutidos na seção 4.4.

Os resultados numéricos obtidos compreendendo todo o período são apresentados no Quadro 4.4. São apresentados diferentes indicadores descrevendo o cenário de cada janela de processamento, tais como o número aproximado de observações faltantes no arquivo RINEX de observação (devido à perdas de sincronismo ou devido à ambiguidades *half-cycle*), o número de casos de $S4 > 0.3$, o desvio-padrão e a média do *REMQ-3D* após o período de convergência, além do número de perdas de ciclos (conforme identificadas pelo RT-PPP).

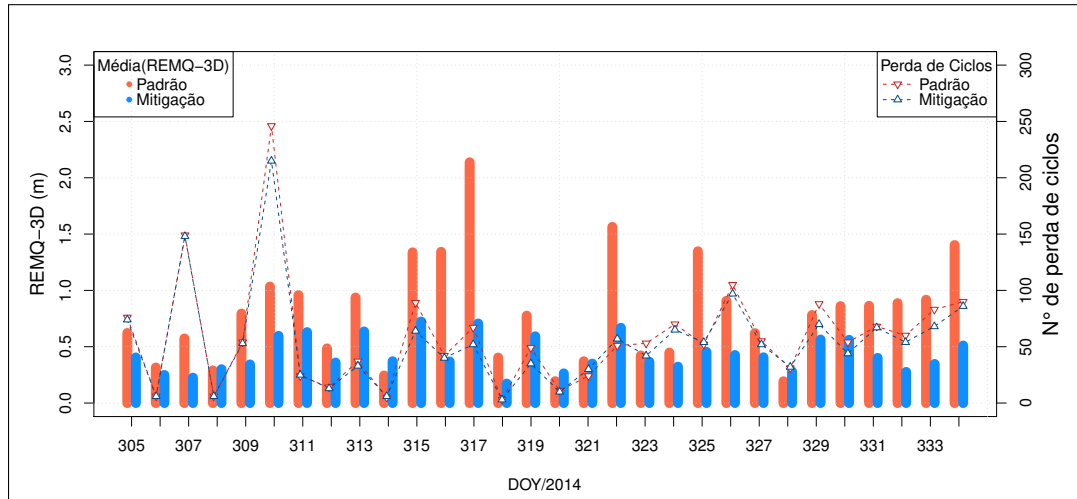
Exemplos gráficos de alguns dias selecionados são apresentados na sequência. O primeiro exemplo de resultado é apresentado na Figura 34, para o dia 03 de Novembro de 2014 (DOY 307/2014). Neste exemplo, a abordagem proposta recuperou a acurácia esperada do PPP. O desvio-padrão do *REMQ-3D* após o período de convergência considerado caiu de 0,54 m para 0,11 m (melhoria de 80%). As precisões das estimativas de coordenadas (conforme obtidas na MVC dos parâmetros ajustados) são apresentadas na Figura 35. Observa-se que as precisões proporcionadas no PPP padrão são muito otimistas, permanecendo ao nível de poucos centímetros, o que não condiz com a realidade obtida na estimativa das coordenadas, onde erros superiores a dois metros foram obtidos (estes aspectos podem ser notados comparando-se as Figs. 34a e 35a). Já no método proposto, as precisões são mais condizentes com a realidade (conforme pode ser notado pela comparação entre as Figs. 34b e 35b).

Outro exemplo é apresentado na Figura 36, para o dia 11 de Novembro de 2014 (DOY 315/2014). Neste exemplo, a abordagem melhorou consideravelmente o desempenho

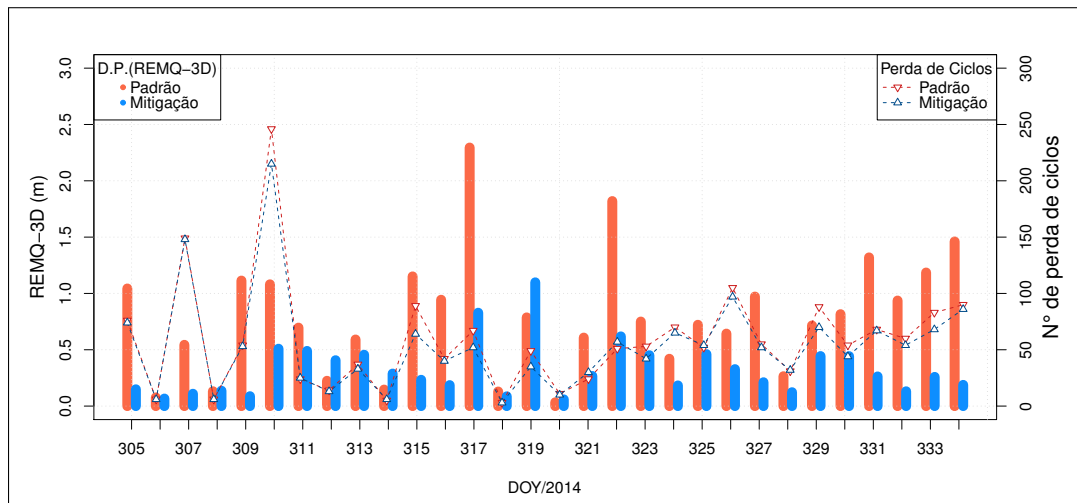
do PPP, alcançando também uma melhoria de 80% no desvio-padrão do *REMQ-3D* após o período de convergência (redução de 1,15 m para 0,23 m.).

Um exemplo no qual o desvio-padrão do *REMQ-3D* não apresentou melhoria é apresentado na Figura 37 – dia 15 de Novembro de 2014 (DOY 319/2014). Neste dia, o desvio-padrão do *REMQ-3D* aumentou de 0,79 para 1,10 m (embora a média do *REMQ-3D* tenha reduzido de 0,78 m para 0,59 m). Ao inspecionar a série temporal dos erros no SGL, observa-se que a magnitude dos mesmos foi reduzida principalmente entre as 20:30 e 20:40 (aproximadamente). No entanto, o número limitado de satélites (de cinco a seis) e a ocorrência de sucessivas perdas de sincronismo após as 20:40 limitaram a eficácia do método proposto. É possível observar (no Quadro 4.4) o alto número de lacunas causadas por perdas de sincronismo, principalmente na frequência L2.

Mais um resultado é apresentado na Figura 38 para o dia 22 de Novembro de 2014 (DOY 326/2014). Neste dia, a melhoria no desvio-padrão do *REMQ-3D* foi de 49% (redução de 0,64 m para 0,33 m). Observa-se que a eficácia do método proposto é limitada pelo alto número de perdas de reinicializações. Porém, os resultados obtidos demonstram que a modelagem proposta reduziu os consequentes períodos de convergência.



(a)

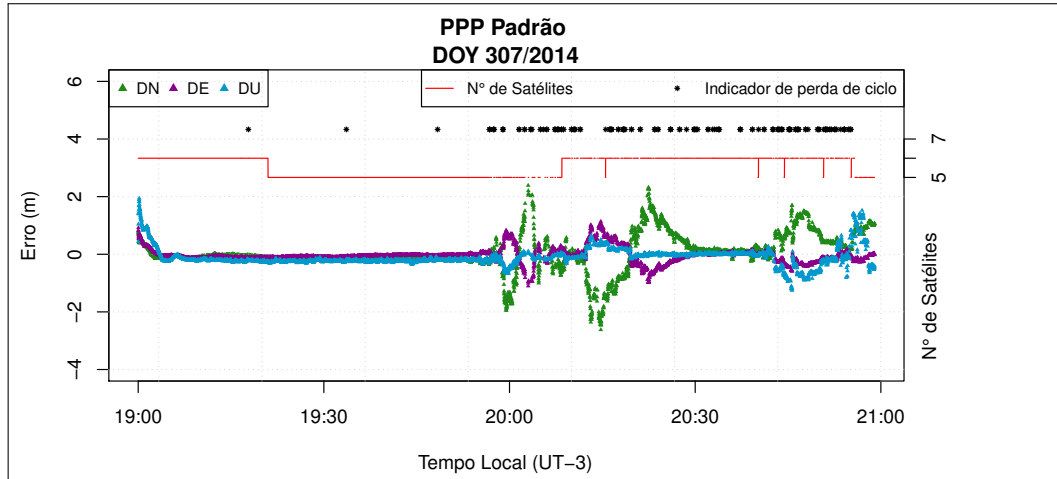


(b)

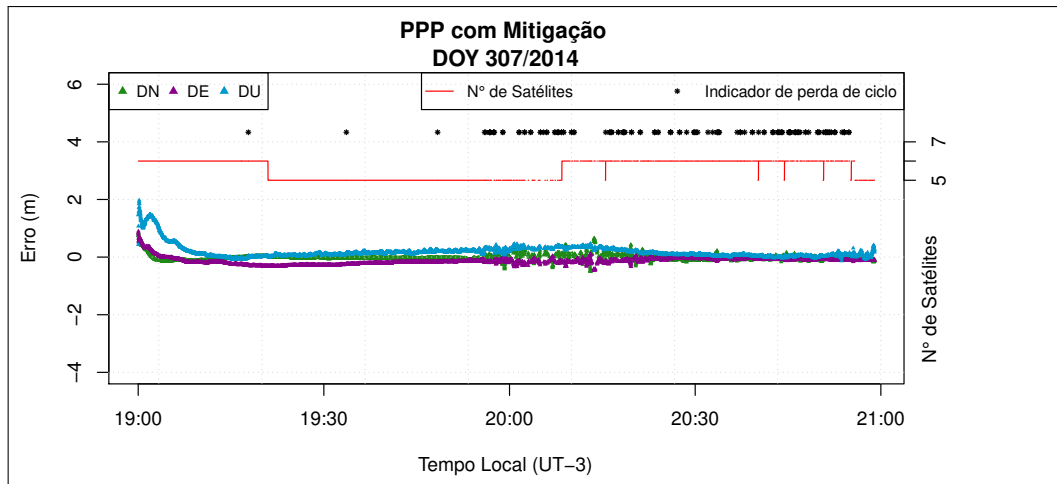
Figura 33 – As barras verticais apresentam a comparação entre o $REMQ-3D$ das soluções PPP padrão e PPP com mitigação (Estação SJC - Novembro/2014). O período de convergência considerado (30 minutos iniciais) não foi utilizado no cálculo das estatísticas do $REMQ-3D$. As linhas pontilhadas representam a quantidade de perdas de ciclo identificadas pelo RT-PPP: (a) média do $REMQ-3D$ e número de perdas de ciclo; (b) desvio-padrão do $REMQ-3D$ e número de perdas de ciclo.

DOY / 2014	Nº aprox. de obs. faltantes no RINEX (1s)				Cintilação		PPP Padrão			PPP com Mitigação		
	Perda de Sincronismo		Ambiguidade Half-Cycle		Nº de S4>0.3		REM-Q3D (m)		Nº de Perda de Ciclos	REM-Q3D (m)		Nº de Perda de Ciclos
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	D.P.	Média		D.P.	Média	
305	9	171	100	0	75	86	1.04	0.62	76	0.15	0.40	74
306	0	0	0	0	0	2	0.08	0.32	6	0.07	0.25	6
307	43	197	655	0	85	92	0.54	0.57	149	0.11	0.23	148
308	0	0	0	0	0	0	0.13	0.29	6	0.14	0.30	6
309	24	74	360	0	20	19	1.11	0.79	54	0.09	0.34	53
310	49	387	1463	0	217	264	1.08	1.03	246	0.51	0.60	215
311	17	18	259	0	49	53	0.70	0.96	24	0.49	0.63	25
312	0	10	88	0	33	37	0.22	0.48	14	0.41	0.36	13
313	8	18	625	0	87	90	0.59	0.94	37	0.46	0.64	33
314	0	0	0	0	0	0	0.15	0.24	5	0.29	0.37	6
315	30	111	235	0	122	131	1.15	1.34	89	0.23	0.72	64
316	15	46	272	0	88	91	0.94	1.34	42	0.19	0.37	40
317	13	47	484	0	136	147	2.30	2.14	67	0.83	0.71	52
318	0	0	0	0	3	7	0.13	0.40	3	0.09	0.17	3
319	3	45	239	0	74	84	0.79	0.78	49	1.10	0.59	35
320	0	6	46	0	5	9	0.03	0.19	11	0.06	0.26	10
321	1	17	197	0	34	38	0.61	0.37	24	0.27	0.35	30
322	10	92	371	0	160	169	1.82	1.56	51	0.62	0.67	57
323	0	74	282	0	76	97	0.75	0.42	53	0.45	0.37	42
324	12	94	112	0	92	96	0.42	0.45	70	0.18	0.32	65
325	11	68	594	0	156	201	0.72	1.35	52	0.46	0.45	54
326	3	145	246	0	115	118	0.64	0.91	105	0.33	0.43	97
327	6	230	400	0	106	116	0.97	0.62	55	0.21	0.41	52
328	1	42	63	0	66	77	0.27	0.19	31	0.12	0.28	32
329	7	77	241	0	151	186	0.72	0.78	88	0.44	0.56	70
330	8	106	342	0	191	210	0.82	0.86	54	0.44	0.56	44
331	24	85	427	0	131	147	1.32	0.86	68	0.26	0.40	67
332	18	40	339	0	114	139	0.94	0.89	60	0.13	0.28	54
333	3	84	435	0	136	142	1.19	0.92	83	0.26	0.35	68
334	12	163	267	0	157	169	1.46	1.40	90	0.19	0.51	86

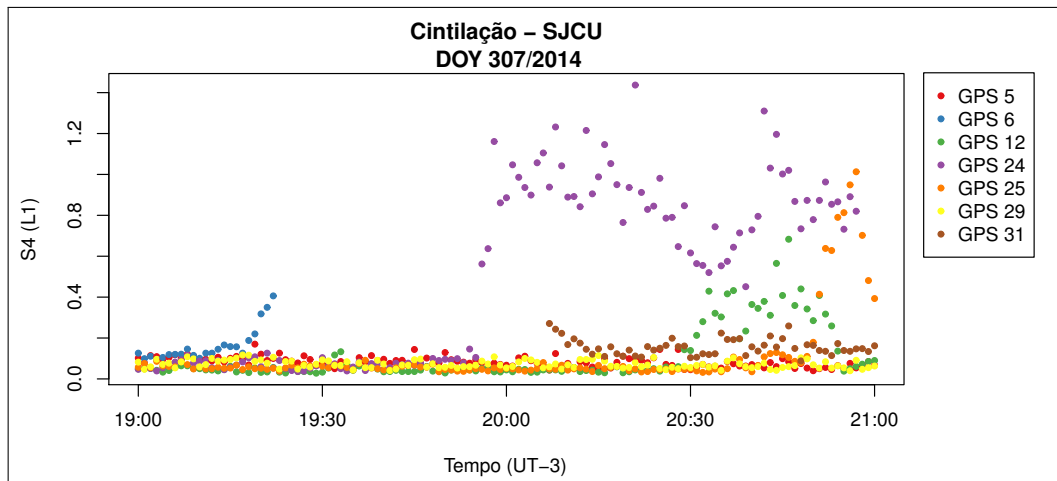
Quadro 4.4 – Resultados numéricos do processamento de dados da estação SJCUC – Novembro/2014.



(a)

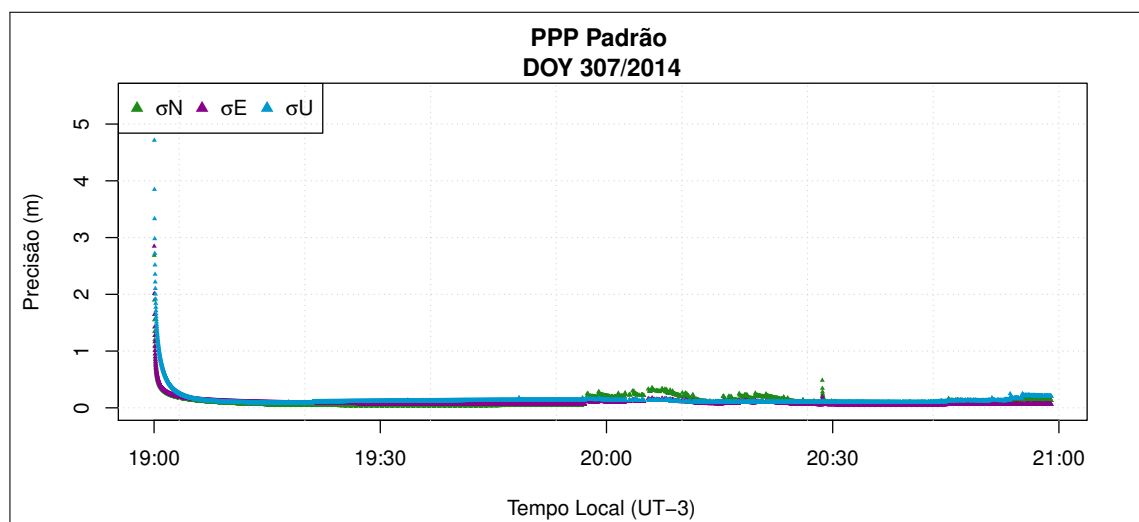


(b)

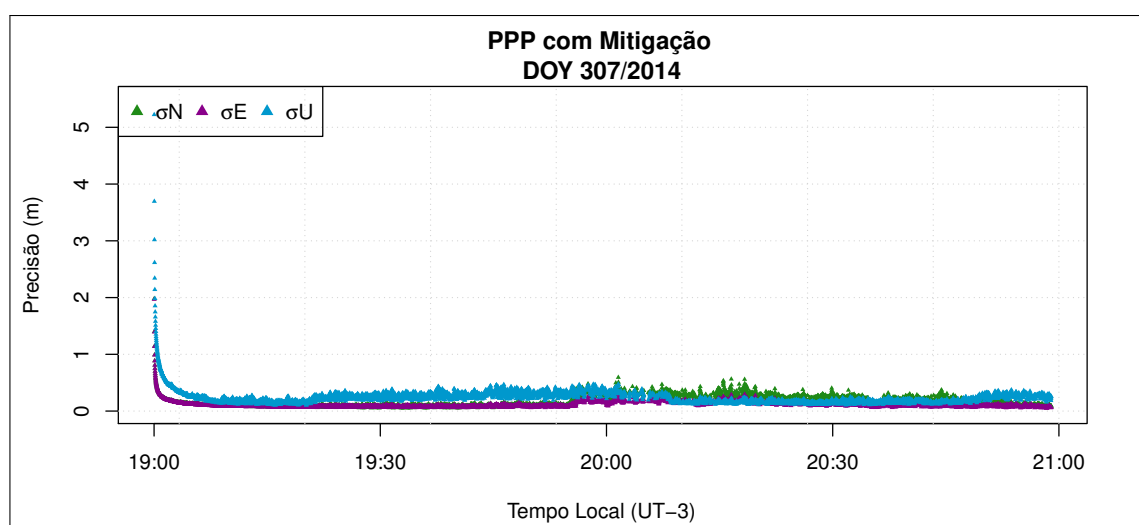


(c)

Figura 34 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 307/2014 – estação SJCU. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP.



(a)



(b)

Figura 35 – Análise das precisões das estimativas de coordenadas nas componentes Norte, Leste e Vertical (conforme obtidas na MVC dos parâmetros ajustados do PPP): (a) precisões obtidas no PPP padrão (sem mitigação) e (b) precisões obtidas no PPP com mitigação para o dia 307/2014 – estação SJC.

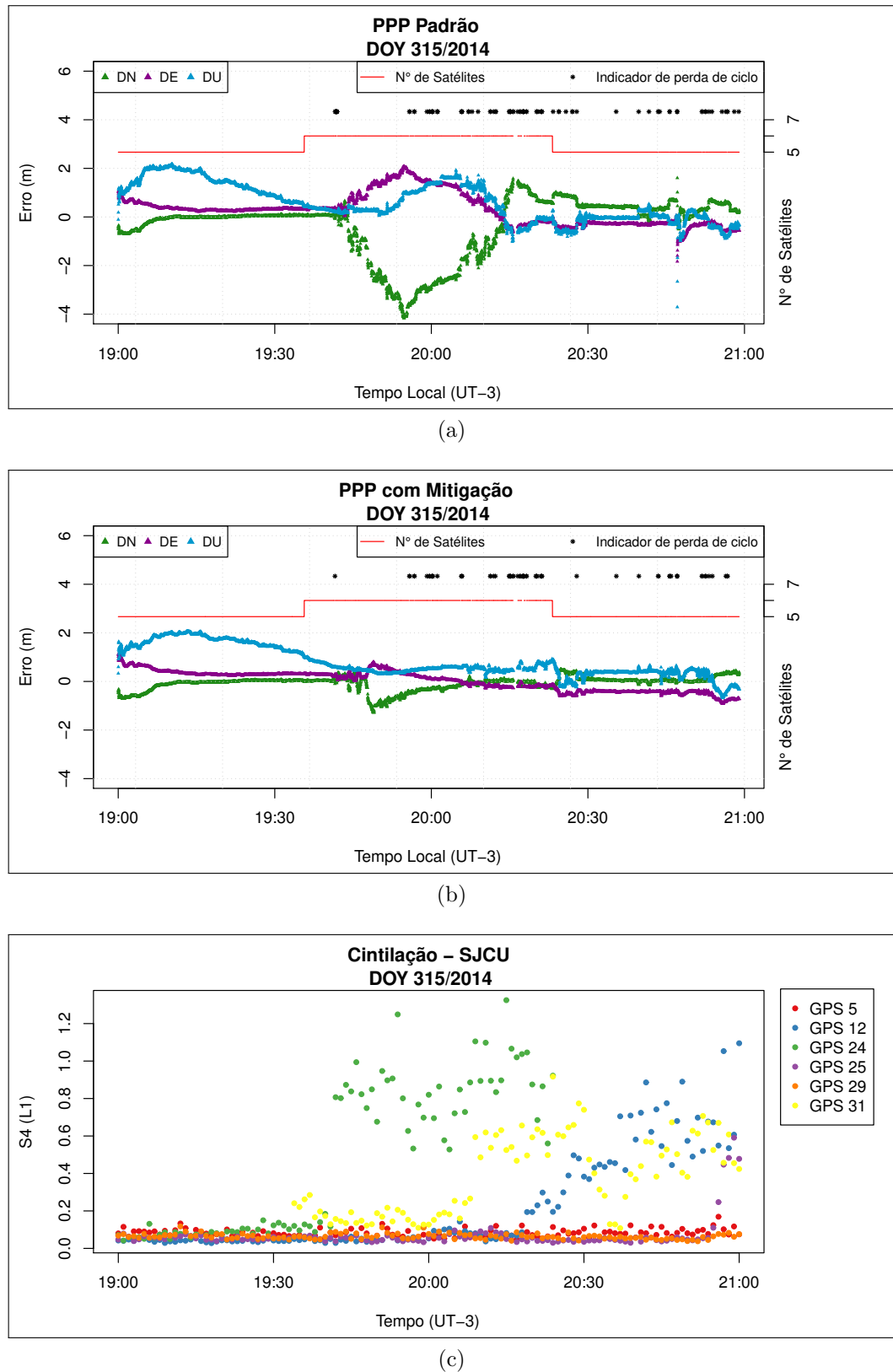


Figura 36 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 315/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP.

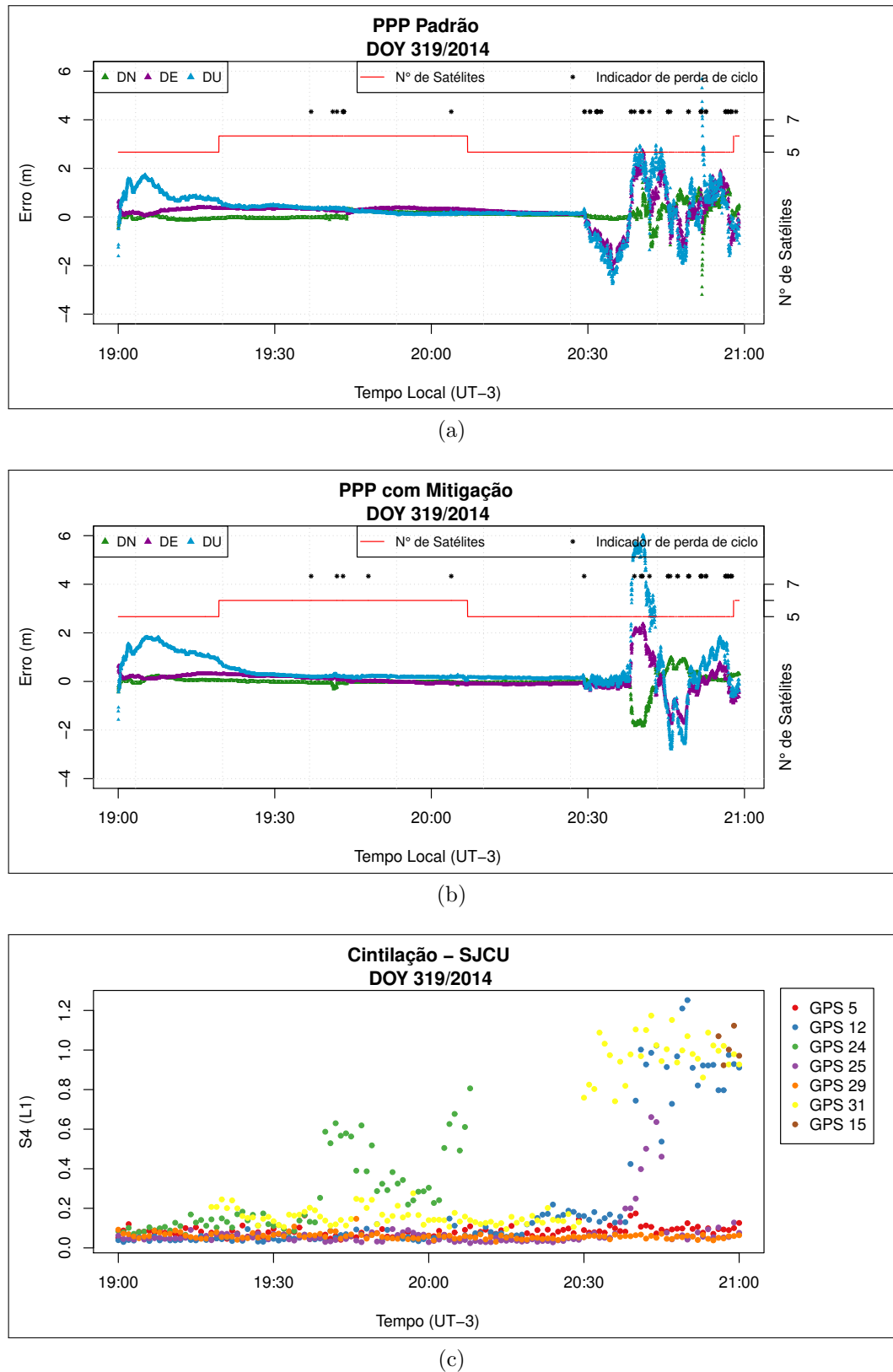


Figura 37 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 319/2014 – estação SJC. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP.

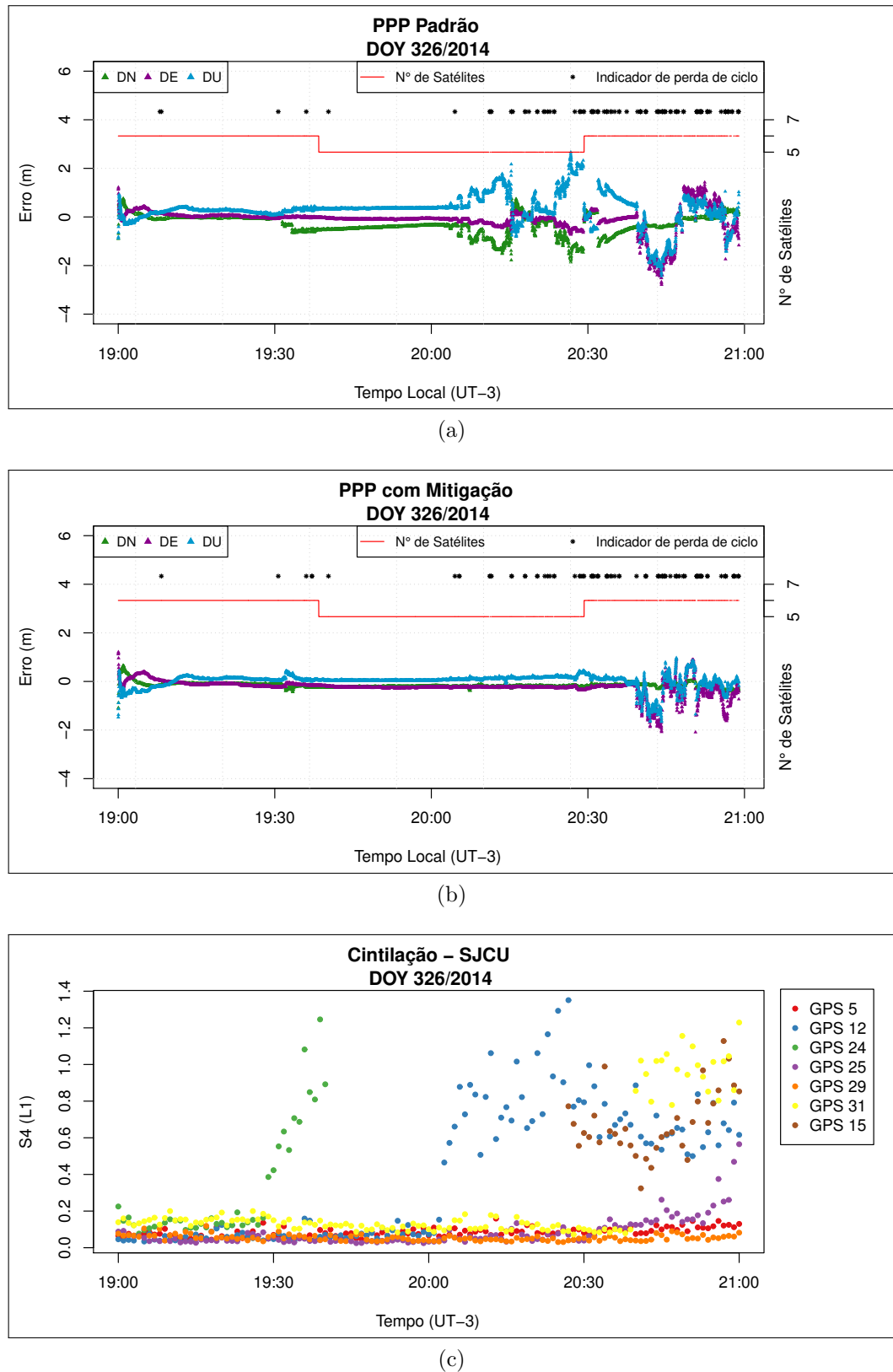


Figura 38 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 326/2014 – estação SJCU. A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP.

4.3.2 Dados coletados em Presidente Prudente/SP

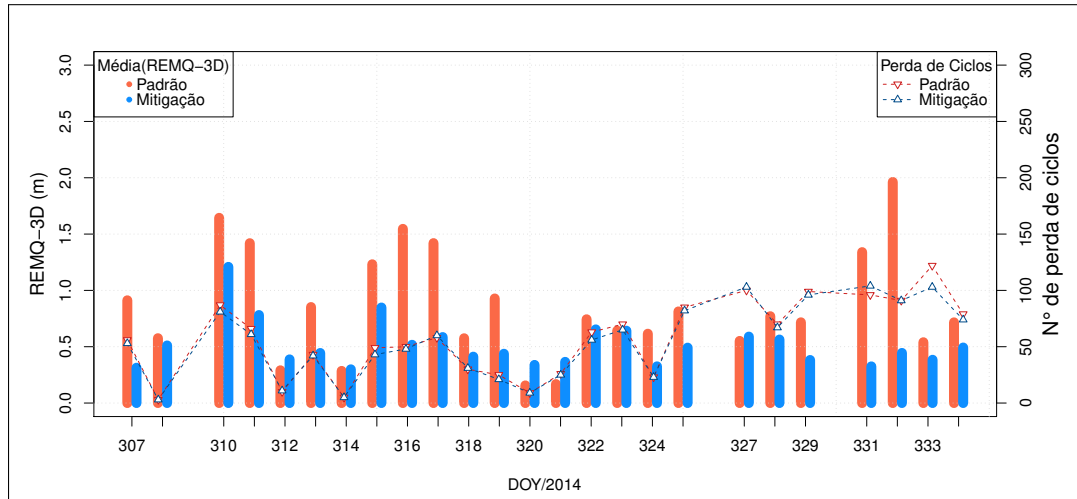
De maneira similar, dados da estação PRU2 coletados nas noites de Novembro/2014 foram processados com o objetivo de comparar a solução PPP padrão com a solução obtida pela abordagem proposta para mitigação.

Resultados comparativos diários compreendendo o período de todo o mês são apresentados na Figura 39. Os resultados numéricos para todo o período são apresentados no Quadro 4.5. Exemplos gráficos de alguns dias selecionados são apresentados na sequência, acompanhados de uma breve discussão. Comentários adicionais e uma discussão aprofundada serão apresentados na seção 4.4.

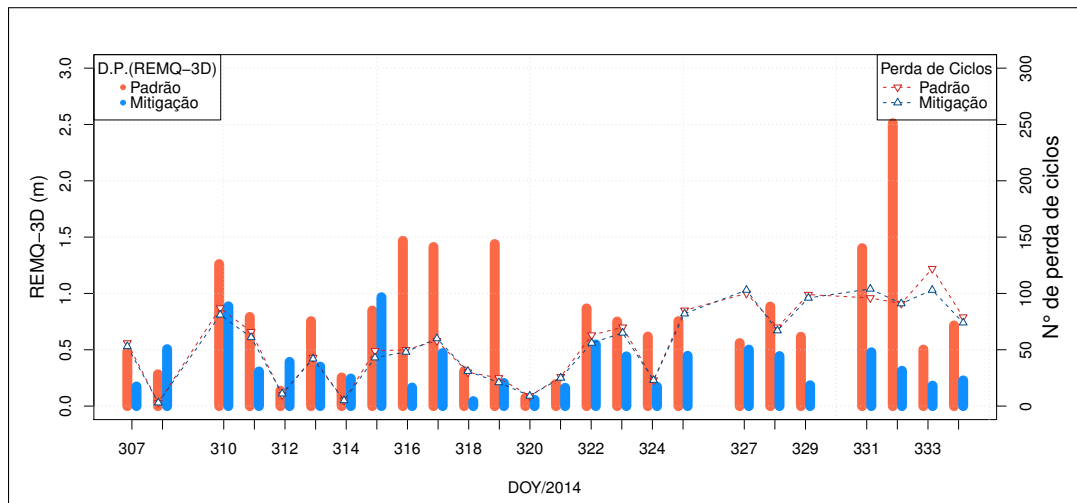
O primeiro exemplo de resultado é apresentado na Figura 40, também para o dia 03 de Novembro de 2014 (DOY 307/2014). Neste exemplo, a abordagem proposta melhorou a acurácia do PPP. O desvio-padrão do *REMQ-3D* após o período de convergência considerado caiu de 0,48 m para 0,17 m (melhoria de 64%).

Os resultados obtidos para o dia 13 de Novembro de 2017 (DOY 317/2014) são apresentados na Figura 41. Neste dia, a eficácia do método também foi limitada – principalmente pela ausência de redundância de número de satélites disponíveis a partir das 20:20 (aproximadamente). Observa-se também um número elevado de lacunas nas observáveis (conforme pode ser visto no Quadro 4.5). O desvio-padrão do *REMQ-3D* reduziu de 1,41 m para 0,47 m (melhoria de 67%). Observa-se também que a solução tornou-se indisponível após às 20:45 (aproximadamente) devido a quantidade de satélites transmitindo o sinal L2C insuficiente para realizar o PPP.

Mais um exemplo de resultado comparativo é apresentado na Figura 42, para o dia 28 de Novembro de 2014 (DOY 332/2014). Neste dia, a magnitude dos erros posicionais foi reduzida consideravelmente, mesmo em face a inúmeras reinicializações e perdas de sincronismo. O desvio-padrão do *REMQ-3D* caiu de 2,51 m para 0,31 m (melhoria de 88%).



(a)



(b)

Figura 39 – As barras verticais apresentam a comparação entre o $REMQ-3D$ das soluções PPP padrão e com mitigação (Estação PRU2 - Novembro/2014). O período de convergência considerado (30 minutos iniciais) não foi utilizado no cálculo das estatísticas do $REMQ-3D$. As linhas pontilhadas representam a quantidade de perdas de ciclo identificadas pelo RT-PPP: (a) média do $REMQ-3D$ e número de perdas de ciclo; (b) desvio-padrão do $REMQ-3D$ e número de perdas de ciclo.

DOY / 2014	Nº aprox. de obs. faltantes no RINEX (1s)				Cintilação		PPP Padrão			PPP com Mitigação		
	Perda de Sincronismo		Ambiguidade Half-Cycle		Nº de S4>0.3		REMQ-3D (m)		Nº de Perda de Ciclos	REMQ-3D (m)		Nº de Perda de Ciclos
	L1	L2	L1	L2	L1	L2	D.P.	Média		D.P.	Média	
307	1	52	70	0	136	150	0.48	0.91	56	0.17	0.31	53
308	0	0	0	0	1	3	0.28	0.58	3	0.51	0.51	3
310	1	135	149	0	237	272	1.26	1.64	87	0.89	1.21	81
311	24	107	74	0	104	113	0.79	1.42	66	0.31	0.78	61
312	0	0	0	0	23	34	0.14	0.29	10	0.39	0.39	11
313	25	38	59	0	96	105	0.75	0.85	43	0.35	0.44	42
314	0	0	0	0	2	4	0.25	0.29	5	0.24	0.30	5
315	6	85	158	0	211	241	0.85	1.23	49	0.97	0.85	43
316	2	91	71	0	91	104	1.47	1.55	50	0.16	0.52	48
317	5	116	224	0	134	137	1.41	1.42	58	0.47	0.59	60
318	12	77	44	0	33	37	0.31	0.58	30	0.04	0.41	31
319	0	24	91	0	85	95	1.44	0.93	25	0.20	0.44	21
320	0	5	4	0	7	7	0.07	0.16	9	0.06	0.34	9
321	3	29	38	0	45	52	0.20	0.17	26	0.16	0.37	25
322	0	83	203	0	127	146	0.87	0.74	63	0.55	0.65	56
323	3	91	30	0	167	184	0.75	0.64	70	0.44	0.64	65
324	0	40	34	0	87	108	0.62	0.62	23	0.17	0.33	23
325	1	249	304	0	145	167	0.75	0.81	85	0.45	0.49	82
327	1	352	194	0	146	153	0.56	0.55	100	0.50	0.59	103
328	6	168	74	0	110	124	0.88	0.77	70	0.44	0.56	67
329	5	551	96	0	125	148	0.62	0.72	99	0.18	0.38	96
331	1	513	205	0	128	137	1.40	1.34	96	0.48	0.33	104
332	6	359	501	0	163	173	2.51	1.96	91	0.31	0.44	91
333	4	338	78	0	104	109	0.50	0.54	122	0.18	0.38	103
334	0	267	85	0	140	167	0.72	0.72	79	0.23	0.49	74

Quadro 4.5 – Resultados numéricos do processamento de dados da Estação PRU2 – Novembro/2014.

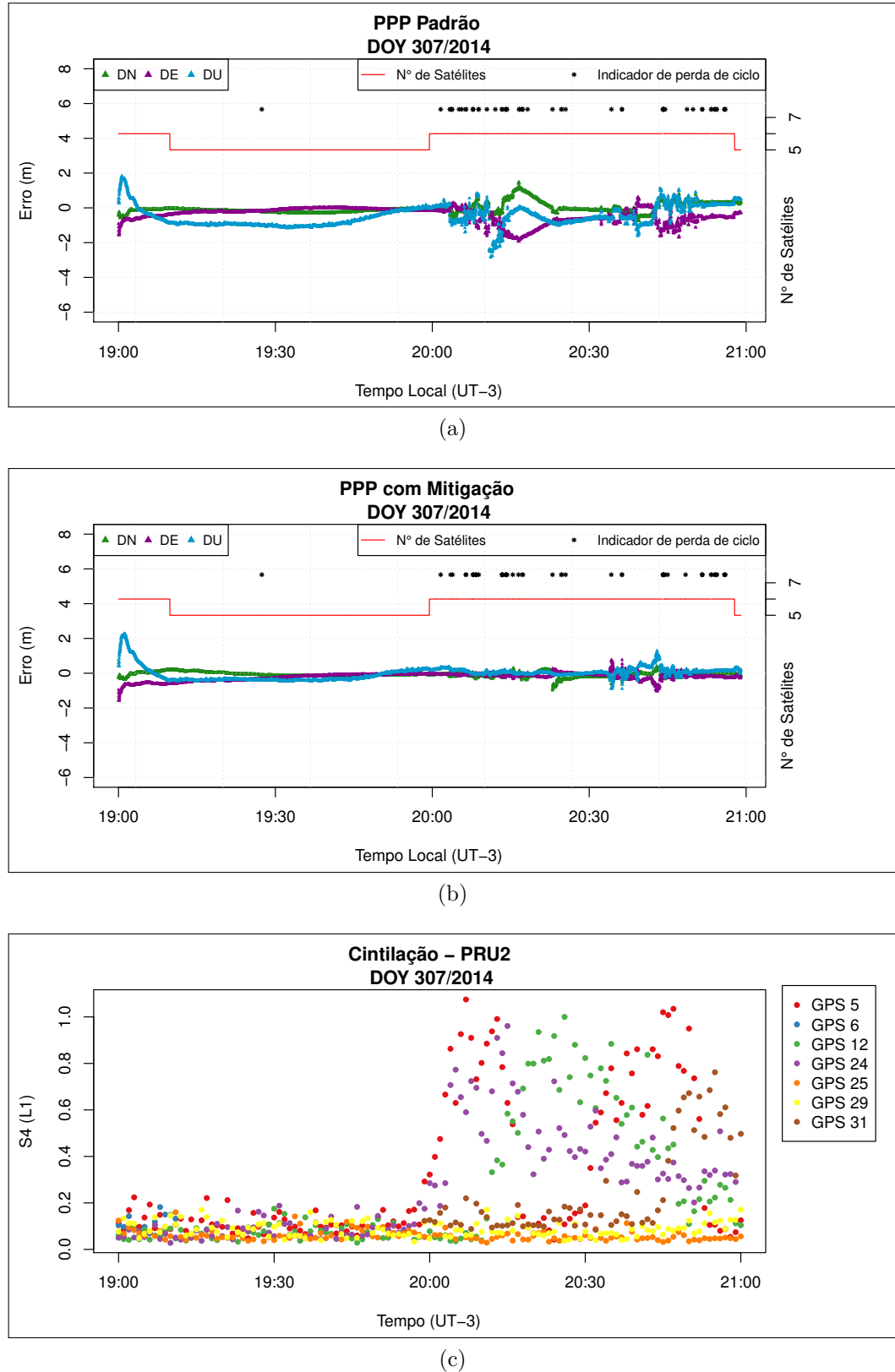


Figura 40 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 307/2014 (PRU2). A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP. (c) Cintilação (índice S4) apenas para os satélites utilizados no PPP.

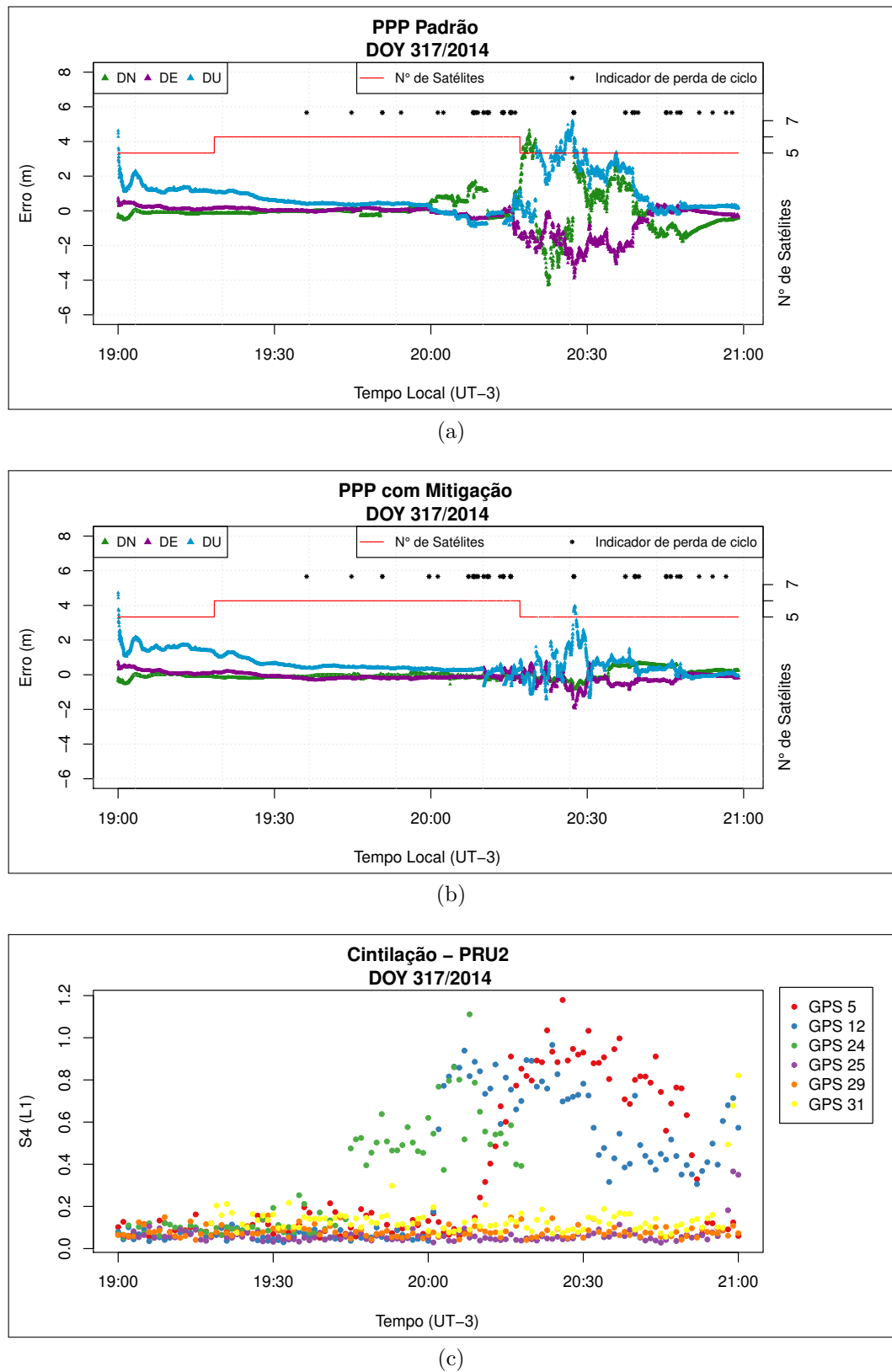


Figura 41 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 317/2014 (PRU2). A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.

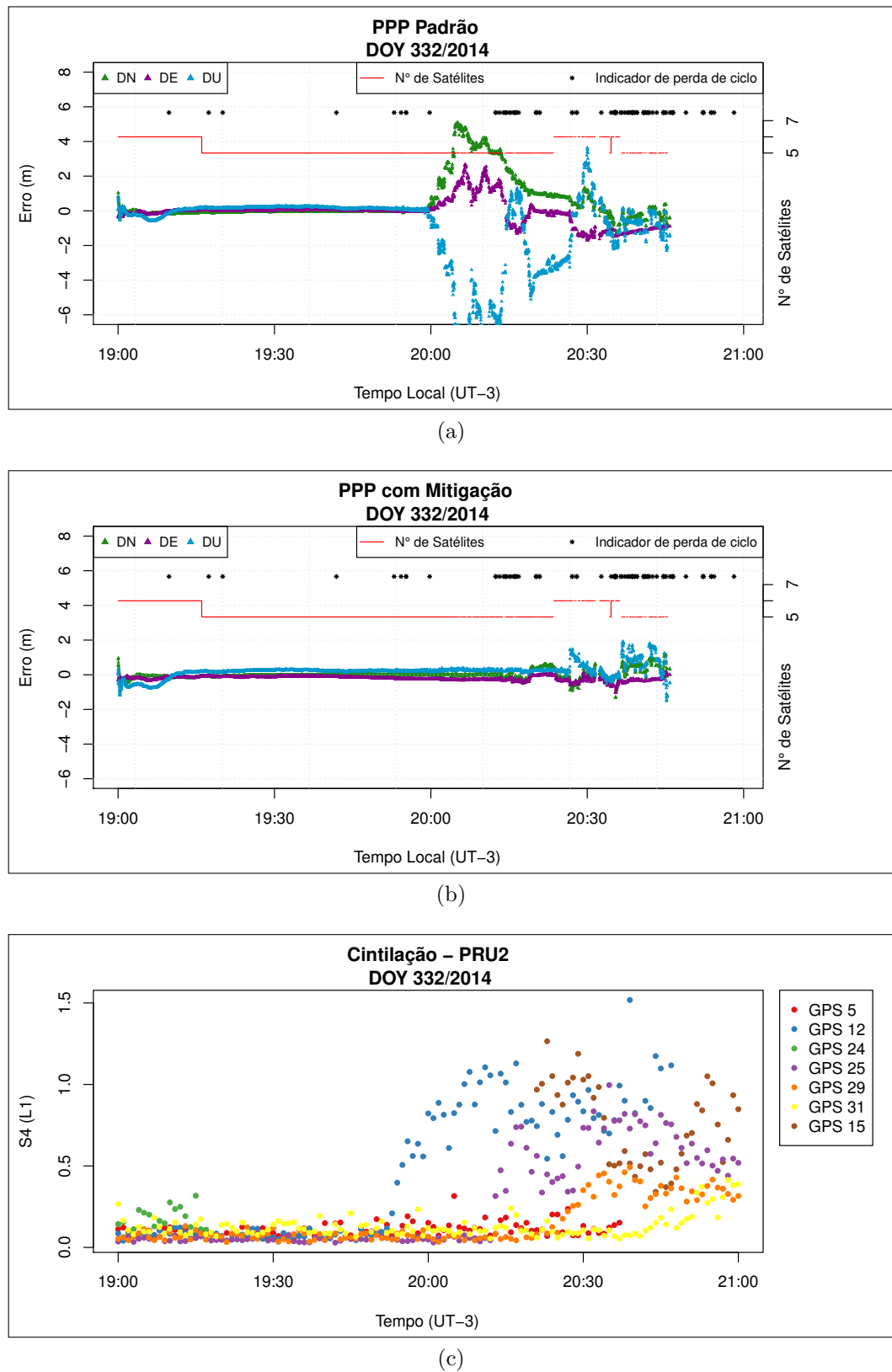


Figura 42 – Comparação entre (a) PPP padrão (sem mitigação) e (b) PPP com mitigação para o dia 332/2014 (PRU2). A acurácia posicional é representada pelos erros no SGL. A linha vermelha representa o número de satélites utilizado na solução em cada época, e os pontos pretos indicam os casos onde uma perda de ciclo foi identificada pelo RT-PPP.

4.4 Discussão e Conclusões

Uma nova abordagem para atenuar os efeitos da cintilação no posicionamento GNSS foi proposta neste trabalho. Tal abordagem tem potencial para aplicações geodésicas em diferentes taxas de observação. A abordagem proposta pode ser implementada em qualquer receptor GNSS. Embora alguns receptores não proporcionem saídas em altas taxas de amostragem, os parâmetros internos de intensidade e fase estão implícitos nos circuitos de rastreamento de cada receptor.

A eficácia das estratégias propostas para mitigação foi verificada por meio de testes realizados com o software científico RT-PPP. Dados de observação das estações de monitoramento (coletados em modo estático) foram pós-processados no modo cinemático – configuração que permite o alcance de acurácia centimétrica em condições de ausência de cintilação. Em complemento, dados de intensidade e fase obtidos a 50 Hz foram utilizados para modelar os efeitos da cintilação nas observáveis de entrada para a realização do PPP. Devido à disponibilidade de dados a 50 Hz dos receptores PolRxS PRO, os testes foram realizados apenas com satélites transmitindo o sinal L2C (constelação limitada).

Subconjuntos de dados coletados no mês de Novembro/2014 permitiram a realização de testes para verificação da eficácia do método proposto, além de outros métodos descritos na literatura, como o modelo de Conker e o modelo α - μ . Os horários selecionados para realização dos experimentos no referido mês foram escolhidos por compreenderem diferentes níveis de cintilação (incluindo cintilação forte) e quantidade suficiente de satélites GPS transmitindo o sinal L2C. Foram processados dados de dias diferentes, abrangendo diferentes cenários de cintilação.

Os resultados obtidos indicaram que na grande maioria dos dias afetados por cintilações fortes o método de mitigação proposto apresentou melhores resultados se comparado à solução PPP padrão. Nos casos em que não houve cintilação, o método proposto apresentou desempenho inferior. Este aspecto também foi verificado nos testes com o modelo de Conker e modelo α - μ , e permitem inferir que os modelos adotados para o caso de cintilações fortes não é adequado para os casos de ausência de cintilação.

Considerando a abordagem proposta, as melhorias na acurácia para os casos de cintilação forte foram superiores a 80% nos melhores casos. Em alguns casos, o método proposto recuperou a acurácia centimétrica esperada para o PPP. É possível inferir também que o método proposto auxiliou no processo de convergência das ambiguidades (N_{IF}) em períodos de cintilação, uma vez que houve melhorias na acurácia do posicionamento mesmo em casos de várias reinicializações de ambiguidade causadas por perdas de ciclo e perdas de sincronismo. Este aspecto também foi observado nos testes com o modelo de Conker e modelo α - μ , no entanto, estes modelos induziram um erro sistemático na solução de coordenadas (isto é, um deslocamento na solução de coordenadas, vide Figura 27, por

exemplo).

Embora alguns dos resultados proporcionados pelo PPP com a mitigação proposta ainda estejam aquém da acurácia esperada, é importante ressaltar que a eficácia do método não pôde ser testada em sua totalidade devido a alguns aspectos pontuais. Primeiramente, devido à indisponibilidade de dados 50 Hz para a saída do DLL do receptor, não foi possível estimar os componentes de erro devido à cintilação que incorrem sobre as pseudodistâncias ($dScint_{PD}$). Como os dados 50 Hz estão disponíveis apenas na saída do PLL do receptor, somente os componentes $dScint_{\phi}$ (para as observáveis de fase) foram estimados. Ainda que a observável de fase desempenhe o papel principal no PPP, espera-se que uma modelagem adequada nas observáveis de pseudodistância e fase, concomitantemente, permita alcançar resultados melhores.

Outro fator limitante foram as ocorrências de inúmeras perdas de sincronismo. Considerando o baixo número de satélites transmitindo o sinal L2C nos conjuntos de dados utilizados, a ocorrência de perdas de sincronismo limitou a continuidade das soluções PPP, como nos casos nos quais havia apenas cinco satélites disponíveis e uma perda de sincronismo ocorreu. Em casos como estes, dependendo do tempo de reaquisição do sinal e da mudança de geometria dos satélites neste intervalo, um novo período de convergência (para todas as ambiguidades) pode ser requerido para a continuidade do PPP. Por outro lado, este aspecto limitante permitiu inferir que o método proposto auxiliou no processo de convergência das ambiguidades em presença de cintilação forte.

Ao avaliar os gráficos de número de perdas de ciclo detectadas, observa-se uma ligeira redução do número de detecções na solução do método proposto (o qual emprega as observáveis de fase corrigidas do erro $dScint_{\phi}$) na maioria dos casos em presença de cintilação forte. Este aspecto permite inferir que o método proposto tem potencial para corrigir eventuais perdas de ciclo em casos de manutenção de sincronismo. Cabe ressaltar que nos testes realizados, nenhuma modificação foi feita no RT-PPP em relação ao algoritmo de Blewitt internamente empregado.

4.5 Recomendações para Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos indicaram que o método proposto tem potencial para atenuar o efeito das cintilações fortes. Já para os casos nos quais não houve cintilação, os resultados foram deteriorados, o que sugere o desenvolvimento de funções de mapeamento alternativas para definir o modelo estocástico utilizado no PPP para casos de ausência de cintilação (ou cintilação muito fraca).

No contexto da detecção de perdas de ciclo, sugere-se a investigação de estratégias alternativas para estabelecer o critério de perda. A configuração de valores mais flexíveis para limiares aplicados em algoritmos de detecção, conforme proposto por Zhang, Guo e

Zhou (2014), poderia reduzir o número de casos de falsas detecções de perdas de ciclo, reduzindo a quantidade de reinicializações de ambiguidades desnecessárias. Uma outra sugestão é a utilização de dados em altas taxas de amostragem (como 50 Hz) para a detecção de uma perda de ciclo com maior confiabilidade.

No contexto do desempenho do PLL/DLL do receptor, sugere-se que novos receptores GNSS contemplem funcionalidades e padrões para a efetiva disponibilização de dados de intensidade e fase em altas taxas de amostragem (como 50 Hz). Nos casos de rastreamento sob presença de cintilação forte, recomenda-se a adoção de configurações internas no receptor que permitam a manutenção do sincronismo mesmo em caso de cintilações mais severas. Neste contexto, investigações similares às conduzidas no escopo deste projeto poderiam ser realizadas em um cenário com menos perdas de sincronismo.

Caso um simulador GNSS esteja disponível, o mesmo pode ser utilizado para um novo rastreamento de sinais em receptores com PLL/DLL modificado(s). Os dados de intensidade em altas taxas de amostragem utilizados neste projeto podem ser utilizados para reconstruir os mesmos perfis de cintilação que incorreram sobre os dados originais. Com o novo rastreamento, dados em presença de cintilação forte e manutenção do sincronismo podem ser explorados visando a estimativa mais confiável de $dScint$ para diferentes observáveis. Esta estimativa pode ser utilizada para melhorar o modelo estocástico adotado com o desenvolvimento de funções de mapeamento alternativas.

Recomenda-se investigações adicionais para descrever a geometria dos satélites visíveis ao usuário e sua relação com os níveis de cintilação. Tipicamente, esta geometria é representada por fatores de diluição de precisão (DOP – *Dilution of Precision*), de forma que os resultados esperados para os diferentes indicadores DOP são melhores quando há maior cobertura de satélites (SEEBER, 2003; HOFFMAN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008). Recomenda-se investigações adicionais visando ao desenvolvimento de indicadores DOP associados à cintilação, os quais poderiam envolver também o uso de diferentes indicadores, tais como os índices de cintilação (S4 e Sigma-phi), geometria de propagação (ângulos γ e β) e/ou o próprio valor do $dScint$. Desta forma, pode-se obter um DOP ponderado pelo efeito da cintilação.

Os testes realizados no escopo deste projeto foram realizados com dados coletados no modo estático. Este tipo de coleta provê suporte à investigação de modelos e melhorias para atenuar diferentes efeitos sistemáticos que incorrem sobre um sinal GNSS no cenário satélite-receptor. Para aplicações com dados cinemáticos, por exemplo, a navegação aérea e a agricultura de precisão, maiores desafios são esperados, uma vez que o deslocamento da antena do receptor do usuário dificulta a estimativa de diversos parâmetros, principalmente os relacionados à fase da onda portadora, como o índice Sigma-phi ou os componentes $dScint_\phi$. Para suportar aplicações como estas, sugere-se a realização de investigações acerca da integração GNSS e sistema inercial. Neste caso, as estimativas de parâmetros

baseados na fase da onda portadora poderiam ser realizadas com maior confiabilidade com o uso de informações do sensor inercial.

Observa-se que várias pesquisas envolvendo índices de cintilação se baseiam em estatísticas de cintilação (como o índice S4) estimadas em intervalos de 60 segundos. Este padrão apresenta diversos aspectos práticos, mas é incompatível com algumas aplicações de posicionamento geodésico, as quais podem ser aplicadas em intervalos de amostragem diferentes. Para pesquisas futuras, recomenda-se que as investigações sejam baseadas em índices de cintilação estimados em diferentes taxas de amostragem, explorando-se o potencial dos dados brutos de intensidade e fase. Por exemplo, podem ser explorados padrões de desvanecimentos na intensidade do sinal (por exemplo, aspectos característicos de desvanecimentos na intensidade do sinal em diferentes regiões e horários).

Embora os experimentos realizados tenham considerado o caso de pós-processamento de dados no modo PPP, a abordagem proposta pode ser utilizada em diferentes métodos de posicionamento, incluindo aplicações em tempo real, como o PPP, DGPS e o RTK. Sugere-se, portanto, a realização de testes da abordagem proposta considerando diferentes métodos de posicionamento e considerando também o caso de aplicações em tempo real.

5 Predição de Cintilação Ionosférica

Prever a ocorrência de cintilação ionosférica é uma tarefa complexa, principalmente considerando sua alta variabilidade diária, dimensão e dinâmica das irregularidades na ionosfera, além da rapidez nas flutuações dos sinais afetados. Nos trabalhos destacados na literatura, a predição de cintilação ionosférica está associada à representação deste fenômeno, tipicamente, pelo índice S4.

O índice S4, considerando o padrão comercial adotado de estimativa em intervalos de um minuto, pode ser inflado pela presença de multicaminhamento do sinal ou pela ocorrência de variações lentas na intensidade. Logo, para determinadas aplicações, como exemplo, a modelagem dos efeitos de cintilação nos receptores GNSS (Capítulo 3) e a mitigação de cintilação ionosférica no posicionamento (Capítulo 4), somente o índice S4 pode ser insuficiente para uma descrição adequada das cintilações (HUMPHREYS; PSIAKI; KINTNER, 2010; MORAES et al., 2013).

Contudo, mesmo com os desafios de prever a ocorrência das cintilações e as possíveis limitações presentes na representação pelo índice S4, deve-se considerar a perspectiva dos usuários de aplicações baseadas na tecnologia GNSS. Nas regiões equatoriais e de baixas latitudes, como no Brasil, aplicações como a agricultura de precisão e navegação autônoma podem ser prejudicadas pela ocorrência de cintilações, causando interrupção dos serviços. Em aplicações *offshore* (exploração de petróleo, por exemplo), a integridade dos levantamentos geodésicos é ameaçada, também causando prejuízo às operações e demanda por métodos alternativos de levantamento. Em casos extremos, ocorre a perda do serviço de posicionamento GNSS, evento crítico para aplicações onde a continuidade do serviço é essencial (TIWARI; STRANGEWAYS; SKONE, 2013). No contexto da aviação civil, a dinâmica da ionosfera e cintilações são entraves para o estabelecimento do sistema GBAS no Brasil. Todos estes aspectos vêm sendo reportados aos pesquisadores do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (e pesquisadores parceiros de outras instituições) nos últimos anos via consultas, principalmente no período de alta atividade solar.

Para usuários destas aplicações, uma previsão acerca da ocorrência de cintilação em determinado local e tempo (com razoável antecedência) deve ser considerada uma tarefa importante. Dependendo dos requerimentos de cada aplicação baseada na tecnologia GNSS, uma previsão acerca do nível esperado de cintilação pode auxiliar no planejamento de operações, permitindo a otimização de tempo e economia de recursos. Para este propósito, o índice S4 – sendo um padrão em receptores comerciais e bem difundido nas comunidades científica e de usuários – é o principal indicador para representar a ocorrência e a severidade das cintilações.

Alguns modelos destacados na literatura são discutidos a seguir. Tais modelos podem ser utilizados para descrever a ocorrência de cintilações, sendo, por vezes, denominados modelos de cintilação ionosférica. Eles objetivam descrever os efeitos deste fenômeno nos sinais de rádio, bem como prever a ocorrência deste fenômeno em certas circunstâncias (WALTER et al., 2010). Uma descrição de modelos existentes destacados na literatura é apresentada na seção 5.1. Na seção 5.2, as abordagens propostas neste trabalho para descrever as cintilações a partir de dados observados, bem como para obter estimativas preditas de sua ocorrência são apresentadas. Uma discussão é apresentada na seção 5.3, seguida de recomendações para trabalhos futuros (seção 5.4).

5.1 Modelos Existentes

Na literatura, são destacados modelos de cintilação teóricos (também denominados climatológicos – os quais são baseados principalmente em aspectos relacionados à propagação dos sinais, cintilação e o clima espacial) e os modelos orientados por dados (na literatura, comparece o termo *data-driven*, que se refere a modelos guiados principalmente por observações de monitoramento e técnicas de assimilação de dados) (WALTER et al., 2010). Cabe ressaltar que não há separação explícita entre estas categorias, comparecendo também abordagens híbridas (por exemplo, modelos teóricos com assimilação de dados, ou modelos orientados por dados com suporte de modelos teóricos). Dentre os resultados proporcionados por tais modelos, destaca-se a obtenção de mapas de cintilação, os quais consistem em produtos em potencial para aplicações baseadas na tecnologia GNSS.

Os modelos teóricos de cintilação – também denominados climatológicos – permitem descrever condições da ionosfera e suas implicações na propagação de sinais de rádio, tais como os sinais GNSS. Este tipo de modelo proporciona suporte a atividades de planejamento, tais como inferências acerca da capacidade de funcionamento de um sistema sob certas condições (BASU et al., 2002; WALTER et al., 2010). Dentre estes, destacam-se o *Wideband Ionospheric Scintillation Model* (WBMOD) (SECAN et al., 1995; SECAN et al., 1997) e o *Global Ionospheric Scintillation Propagation Model* (GISM) (BÉNIGUEL; HAMEL, 2011).

O WBMOD começou a ser desenvolvido na década de 1970. Em síntese, trata-se da junção de um modelo climatológico global com um modelo de propagação. O modelo climatológico reúne uma coleção de modelos empíricos que visam descrever a distribuição global e o comportamento das irregularidades ionosféricas que causam as cintilações. Tal modelo admite parâmetros de entrada temporais, tais como época do ano e horário local, espaciais (latitude e longitude) e geofísicos (ciclo solar e atividade geomagnética). Já o modelo de propagação é baseado em uma descrição tridimensional das irregularidades, a qual permite estimar o nível das cintilações de amplitude (S4) e de fase (Sigma-phi) nos

sinais de rádio em determinados cenários. O WBMOD foi desenvolvido por pesquisadores da *Northwest Research Associates, Incorporated* (NWRA), sendo incorporado no pacote de software licenciado denominado SCINTMOD.

Outro modelo destacado na literatura é o GISM, o qual é composto por um modelo de propagação que visa reproduzir as flutuações sofridas por um sinal de rádio ao se propagar pela ionosfera. Desta forma, usuários destes sinais (dentre estes os usuários de GNSS) podem estimar possíveis degradações, tanto em amplitude, quanto em fase. O funcionamento do GISM segue o princípio da técnica *Multiple Phase Screen*, que visa dividir a ionosfera em várias camadas perpendiculares ao eixo principal de propagação. Desta forma, pode-se modelar o sinal que se propaga pelas diferentes camadas considerando propriedades estatísticas de cada uma destas camadas. A solução deste problema é iterativa e envolve cálculos de propagação. Dentre seus parâmetros de entrada, o GISM considera o fluxo solar médio e a densidade eletrônica (obtida pelo modelo NeQuick). Dentre os parâmetros de saída, o GISM proporciona valores médios para os índices de cintilação S4 e Sigma-phi. Béniguel e Hamel (2011) destacam que no modelo, o meio de propagação no qual ocorrem as cintilações é considerado estatisticamente homogêneo, diferentemente da situação real, já que o meio apresenta estruturas desiguais (irregularidades). Isto leva a uma superestimação na quantidade de *links* afetados por cintilações, já que, devido às estruturas desiguais, nem todos os *links* seriam necessariamente afetados em uma situação real. Por esta razão, para a avaliação dos resultados do modelo, os autores destacam que apenas valores médios (tanto observados, quanto modelados) podem ser comparados.

A Figura 43 apresenta exemplos dos modelos WBMOD (Fig. 43a) e GISM (Fig. 43b). Observa-se que os mapas apresentam um aspecto de suavização indicando as regiões onde a cintilação é esperada. Os mapas não são designados para representar as irregularidades de pequena escala que causam as cintilações nos sinais GNSS, além de não possuir detalhamento para representar o efeito da cintilação em cada *link* satélite-receptor.

Ressalta-se também que, no Brasil, está em curso de desenvolvimento na Divisão de Aeronomia do INPE um modelo de cintilação denominado *Brazilian Ionospheric Scintillation Model* (BISM). Espera-se que os resultados apresentados no escopo desta tese contribuam com o desenvolvimento do mesmo.

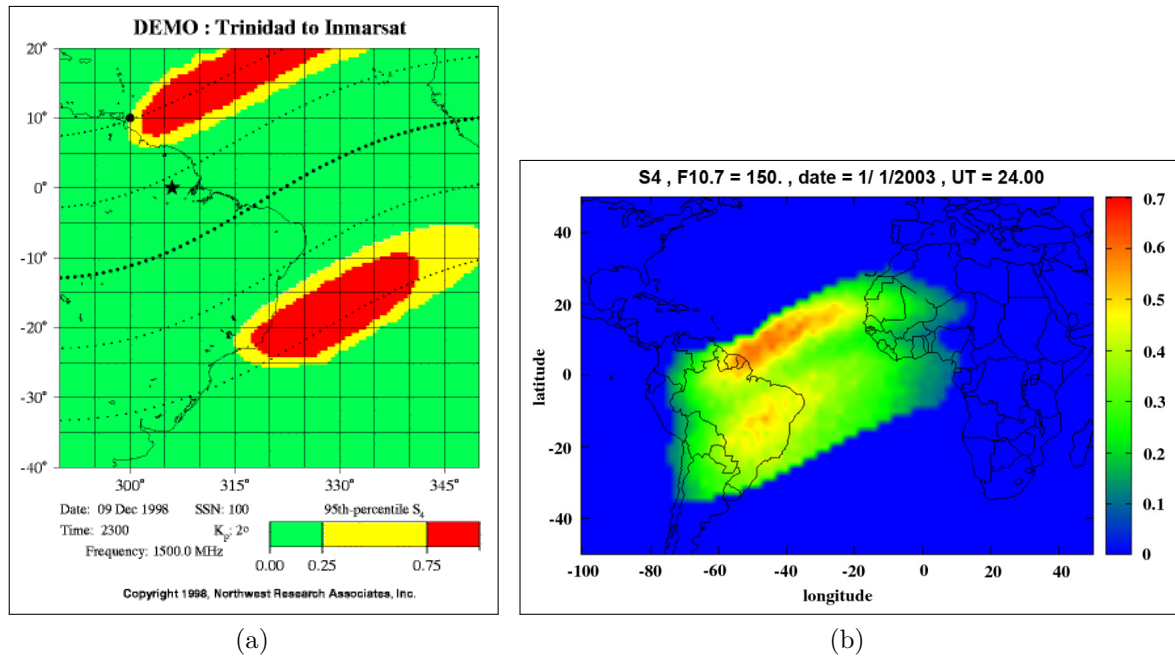


Figura 43 – (a) Mapa de índice S4 esperado obtido pelo WBMOD. Fonte: NorthWest Research Associates, Inc. (NWRA) (2011); (b) Mapa de índice S4 esperado obtido pelo GISM. Fonte: adaptado de Béniguel e Hamel (2011).

Outros modelos são descritos na literatura, os quais visam proporcionar aos usuários indicadores (mapas ou outras representações gráficas) de cintilação, incluindo previsões de ocorrência para determinada região e horário.

Em Rezende et al. (2007), mapas de cintilação (índice S4) são utilizados para a identificação de bolhas ionosféricas na região brasileira. O trabalho, que foi realizado no contexto do ciclo solar 23, é baseado em dados de um projeto denominado SCINTIMON (um hardware desenvolvido pela *Cornell University* para o monitoramento de cintilação com dados GPS). Os dados de índice S4 a cada minuto foram interpolados sobre um período de 10 minutos, permitindo assim a obtenção de superfícies suavizadas indicando a ocorrência das bolhas ionosféricas.

Em Sreeja, Aquino e Elmas (2011), mapas de cintilação (também do índice S4) e mapas de erros de rastreamento (conforme obtidos pelo modelo de Conker) são apresentados, sendo representados em função do tempo (minuto a minuto) e latitude dos IPPs. A representação pelo modelo de camada simples da ionosfera foi utilizada, além da projeção dos índices de cintilação nos IPPs.

Em Kieft, Aquino e Dodson (2014), mapas de S4 e Sigma-phi foram criados. A projeção de IPPs foi utilizada para representar os índices considerando uma rede de estações de monitoramento. Posteriormente, os índices projetados foram interpolados com o método de krigagem ordinária. A interpolação proporciona uma representação da ionosfera como uma superfície suavizada. Os mapas foram criados com a mesma taxa de observação dos índices de monitoramento, ou seja, minuto a minuto. Possíveis limitações do método são

discutidas pelos autores e devem ser levadas em consideração por usuários dos mapas. Ao comparar os resultados obtidos pelos mapas e índices obtidos por estações externas (validação cruzada), foi verificado que os mapas apresentaram boa representatividade das cintilações.

De maneira similar, a interpolação pelo método de krigagem ordinária foi utilizada para criação de mapas de cintilação em Hamel et al. (2014). Em complemento aos dados de monitoramento, o modelo GISM foi utilizado para melhorar a cobertura espacial de informações acerca da cintilação.

No Brasil, há um serviço disponibilizado pelo INPE para geração de mapas de cintilação (índice S4). Os dados de estações de monitoramento são utilizados como entrada para a interpolação de um mapa de cintilação minuto a minuto. Um exemplo de mapa disponibilizado por este serviço é apresentado na Figura 44. Observa-se que a abordagem baseada em dados para a geração de mapas permite verificar as regiões onde há ocorrência de cintilações, conforme observadas pelo alto valor no índice S4.

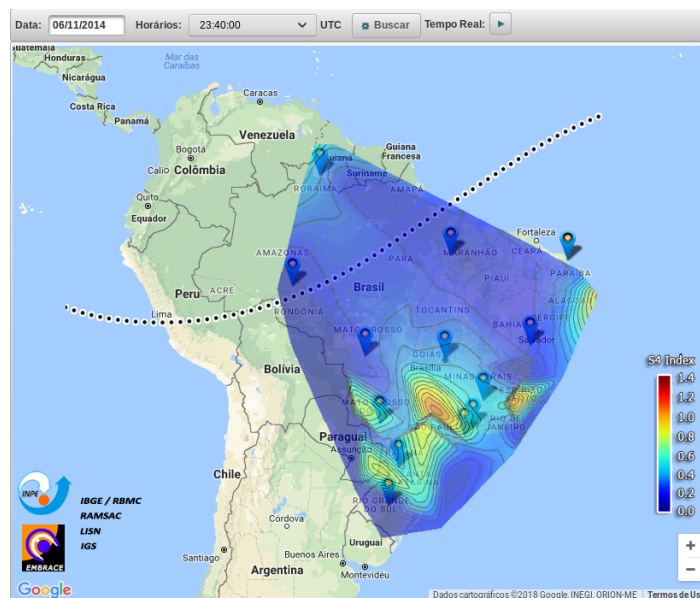


Figura 44 – Exemplo de mapa de cintilação (S4) disponibilizado pelo INPE para o dia 06 de Novembro de 2014 às 23:40 (UTC). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2014).

Em Cesaroni et al. (2015), diferentes tipos de mapas incluindo TEC e cintilação (S4) são apresentados. Os mapas foram criados com o software *Ground Based Scintillation Climatology* (GBSC), uma ferramenta desenvolvida no *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* (INGV) da Itália, com recursos para geração de mapas de quantis, média, desvio-padrão e outras estatísticas associadas ao monitoramento da ionosfera assumindo o modelo de camada simples e a projeção de IPPs (SPOGLI et al., 2009; ALFONSI et al., 2011). No GBSC, há um recurso para agregação de dados de diferentes estações em grades

de determinada resolução, por exemplo $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitude/longitude). Posteriormente, os dados acumulados em cada célula desta grade podem ser agregados por uma função, como a média, desvio-padrão, porcentagem de valores acima (ou abaixo) de determinado limiar, dentre outras. No trabalho apresentado por Cesaroni et al. (2015), uma função de mapeamento foi utilizada para projetar o índice S4 (obtido em cada *link* satélite-receptor em sua trajetória inclinada) para a vertical, utilizando-se uma função de mapeamento definida em Spogli et al. (2013).

Outros trabalhos presentes na literatura (incluindo alguns aplicados à região brasileira) consistem em modelos preditivos que tem por principal característica a previsão de condições esperadas acerca dos níveis de cintilação em determinados cenários. Este tipo de modelo, também baseado na utilização de dados de monitoramento, normalmente apresenta aspecto de cobertura limitado à região de abrangência dos dados.

Em Rezende et al. (2010), abordagens de mineração de dados preditiva são aplicadas num modelo para a região brasileira. Dados de monitoramento de cintilação obtidos na região equatorial (especificamente, em São Luís/MA) foram utilizados como atributos de entrada para prever o nível de cintilação esperado na região do pico da anomalia equatorial, em São José dos Campos/SP. Além dos dados de monitoramento obtidos por receptores GNSS (índice S4), foram utilizados também parâmetros da atividade solar (F10.7), índice geomagnético (Kp) e dados obtidos por sondas digitais (ionossonda) na região equatorial. Dentre os resultados proporcionados pelo modelo, destaca-se a previsão do perfil de cintilação com antecedência de uma a quatro horas. Este perfil consiste na suavização do índice S4 para uma determinada estação, uma vez que o mesmo apresenta alta variabilidade. Foi utilizada a suavização por média a partir de janelas deslizantes de 15 pontos. Para o treinamento do algoritmo e realização de testes de predição com algumas horas de antecedência, novos dados observados podem ser incorporados ao conjunto de treinamento do modelo. No entanto, é necessário considerar as diferentes fontes de origem e taxas de observação dos parâmetros de entrada. Considerou-se que nenhum dado observado da variável resposta poderia ser incorporado ao conjunto de treinamento antes da decorrência da janela de predição proposta. Exemplo: se a predição fosse proposta com antecedência de uma hora, seriam utilizadas apenas variáveis de entrada observadas há, no mínimo, uma hora.

A estratégia de se utilizar dados de uma determinada região para descrever a cintilação esperada em outras regiões também é destacada por Shume e Mannucci (2013). Tais autores também destacam o potencial de se desenvolver modelos de previsão de cintilação aplicados a direções oeste com base em informações coletadas, mais cedo, nas regiões a leste. Esta conclusão foi obtida a partir da análise de valores de índice S4 observados por satélites geoestacionários. Foram analisados dados de IPPs alinhados ao equador magnético em diferentes longitudes, e os resultados indicaram que as cintilações

mais a leste observadas mais cedo seriam provavelmente observadas mais a oeste mais tarde. Cabe destacar que, na maioria dos casos, as irregularidades que causam as cintilações evoluem na direção leste-oeste (conforme destacado em diversos trabalhos, como em Shume et al. (2013) e Muella et al. (2017)). No entanto, a diferença do horário do pôr-do-sol no horário local nas diferentes regiões pode ser utilizada em favor das previsões considerando a utilização de dados observados mais a leste (mais cedo) para aplicar previsões mais a oeste (mais tarde).

Outro trabalho relacionado é apresentado por Lima et al. (2015), o qual também emprega mineração de dados preditiva. Neste trabalho, uma proposta para previsão do nível de cintilação sobre São Luís (MA) é apresentada. Dados coletados entre 17:30 e 19:00 (LT) foram utilizados para prever o nível de cintilação esperado para o resto da noite. Foram definidos dois níveis baseados no valor do índice S4. O primeiro nível ($S4 < 0,5$) representa cintilação ausente, fraca a moderada; e o segundo nível ($S4 \geq 0,5$) representa cintilação forte. A abordagem não prevê o horário de início e término das cintilações, apenas o nível esperado para a mesma noite. Para a definição dos níveis, utiliza-se o máximo valor do índice S4 observado para uma estação. Foram utilizadas 13 variáveis de entrada com o intuito de prever a mencionada classificação de dois níveis para o índice S4. Dentre estas variáveis, destaca-se a utilização do indicativo de fluxo solar (F10.7) e demais variáveis obtidas ou derivadas por dados de digissonda. Os resultados da classificação obtidos por Lima et al. (2015) foram satisfatórios, evidenciando o potencial de aplicação de redes neurais artificiais na predição de cintilação ionosférica.

Vários trabalhos também são descritos para a região da Índia. Em Sridharan, Bagiya e Sunda (2012), dados de variações no TEC obtidos por receptores GPS são utilizados como atributos de entrada para previsão de ocorrência de cintilação. O modelo desenvolvido visa detectar características nos dados que representem as instabilidades na ionosfera que levam à ocorrência de cintilação. Dados observados próximos ao horário do pôr-do-sol local são utilizados para prever quando e por quanto tempo as cintilações estarão propensas a ocorrer ao longo da noite. Resultados adicionais e avaliações são apresentados em Bagiya, Sridharan e Sunda (2013), onde é enfatizado o uso de observações próximas do horário do pôr-do-sol local (entre 18:30 e 19:30 LT) para realizar inferências sobre a dinâmica da ionosfera que podem ser utilizadas para descrever o comportamento esperado de cintilação (por exemplo, o máximo valor de índice S4) ao longo da noite. Resultados adicionais (SRIDHARAN et al., 2014), avaliação crítica (BAGIYA et al., 2014) e refinamento dos modelos (SRIDHARAN et al., 2015) são apresentados na sequência.

Observa-se que nos modelos destacados, alguma abordagem para representação suavizada da cintilação é o objeto da predição. A predição dos níveis de cintilação que afetam individualmente cada *link* satélite-receptor é limitada pela alta variabilidade e rapidez nas flutuações que incorrem sobre o sinal GNSS conforme ele se propaga por

irregularidades de pequena escala na ionosfera. Logo, os modelos proporcionam indicativos de perfis, valores médios, classificações ou outras representações suavizadas para descrever as cintilações.

Outros trabalhos presentes na literatura evidenciam o potencial de uso de mineração de dados preditiva – especificamente o uso de redes neurais artificiais – aplicados à modelagem da dinâmica da ionosfera. Em Tulunay et al. (2006), valores observados de $vTEC$ foram utilizados para previsão de valores futuros do mesmo atributo. Em Machado e Junior (2013), um modelo baseado em redes neurais para predição de $vTEC$ com base nas estimativas anteriores também é apresentado. Os dados de $vTEC$ observados nas últimas 72 horas, aliados à informação de tempo (horário universal) e coordenadas de IPP são utilizados para prever os valores de $vTEC$ futuros. Em Ferreira et al. (2017), um algoritmo baseado em rede neural artificial é utilizado para predição de valores de TEC em estações cujo valor é desconhecido com base em uma rede de estações vizinhas. Destaca-se que, além das redes neurais artificiais, outras abordagens são descritas na literatura, por exemplo, árvores de decisão. Nesta tese, as investigações foram direcionadas à abordagem de redes neurais artificiais.

5.2 Abordagem Proposta

Neste trabalho, propõem-se a criação de dois tipos de mapas de cintilação: observados e preditos. Para ambos os casos, adotou-se o índice S4 para a representação da cintilação. Para a criação destes mapas, dados de monitoramento de cintilação de três redes diferentes foram integrados em uma base de dados, conforme será apresentado na subseção 5.2.1. A metodologia para a criação dos mapas de cintilação observados é apresentada na subseção 5.2.2. O modelo preditivo desenvolvido, baseado em redes neurais artificiais, e os mapas de cintilação preditos são apresentados na subseção 5.2.3.

Os mapas observados permitem a caracterização da ocorrência de cintilação considerando índices de cintilação advindos da integração de diferentes bases de dados de monitoramento. Tais mapas podem auxiliar usuários de aplicações GNSS em etapas de pós-processamento de dados, tais como o controle de qualidade de levantamentos geodésicos e relatórios de atividades. Já os mapas preditos têm por principal finalidade auxiliar em etapas de planejamento de operações envolvendo posicionamento GNSS, tais como cronograma de operações e gerenciamento de riscos, visando a otimização do tempo e a economia de recursos.

5.2.1 Integração de Bases de Dados de Monitoramento de Cintilação por GNSS e disponibilização via software ISMR Query Tool

Dados de monitoramento da ionosfera oriundos de três redes de monitoramento por GNSS em operação na região brasileira foram utilizados para a elaboração dos mapas de cintilação. Uma integração de bases de dados foi realizada, a qual permitiu o aumento da cobertura espacial de monitoramento.

Nesta integração, além dos dados da rede CIGALA/CALIBRA, foram incorporados dados da rede do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA)¹ e da rede *Low-Latitude Ionospheric Scintillation Network* (LISN)². Destaca-se que, para os dados LISN, um serviço exclusivo de transferência via *File Transfer Protocol* (FTP) foi disponibilizado à FCT/UNESP para a automação da importação de dados em fluxo contínuo.

Os receptores das redes CIGALA/CALIBRA e ICEA são do mesmo modelo (Septentrio PolaRxS PRO), o que torna os dados de monitoramento compatíveis (62 colunas no arquivo ISMR padrão, incluindo os índices S4 e Sigma-phi). Já a maioria dos receptores da rede LISN são do modelo NovAtel GSV4004B, cujos dados disponibilizados incluem apenas os identificadores de tempo, satélite, azimute, elevação e índice S4 (L1).

Os modelos de receptores GNSS destas redes proporcionam estimativas de índice S4 a cada minuto, as quais foram incorporados ao banco de dados disponível no software ISMR Query Tool (VANI; SHIMABUKURO; MONICO, 2017) e disponibilizados à comunidade científica pela internet. Com a integração, o banco de dados de monitoramento passa a contar com mais de 1.000.000.000 (um trilhão) de registros de índices de cintilação. Atualmente, o banco de dados é mantido com o suporte de um sistema gerenciador (PostgreSQL). Estes recursos (banco de dados e software ISMR Query Tool) estão hospedados em servidores mantidos pela FCT/UNESP no contexto do Laboratório de Geodésia Espacial (LGE). Eles vêm sendo disponibilizados (desde 2011) à comunidade científica pela internet como ferramentas de apoio à realização de pesquisas.

Enquanto os receptores Septentrio registram os índices no sistema de tempo GPS, os receptores da rede LISN utilizam o sistema de tempo UTC. Logo, verifica-se a diferença de alguns segundos entre os registros devido à diferença de tempo entre o sistema de tempo GPS e UTC (*leap seconds*). Esta diferença (que variou de 16 a 18 segundos durante os anos de 2011 a 2016, por exemplo) deve ser considerada para aplicações que requeiram o uso da base de dados integrada. Os registros de monitoramento abrangem o período de 2011 até a presente data (Fevereiro de 2018). Logo, os dados de monitoramento compreendem a ascensão, o pico e o declínio do ciclo solar n° 24. A Figura 45 apresenta a localização das

¹ Os dados do ICEA estão disponíveis para download em <<http://gnss.icea.gov.br>>, acesso em 01 Mar. 2018.

² Os dados LISN estão disponíveis para download na plataforma disponível em <<http://lisn.igp.gob.pe>>, acesso em 01 Mar. 2018.

estações, sendo identificadas pelas respectivas redes de origem.

A compatibilidade entre receptores NovAtel GSV4004B e receptores Septentrio pode ser realizada por meio da comparação do índice S4 obtidos por estações próximas entre si. Um exemplo é apresentado na Figura 46, a qual apresenta um comparativo de dados de monitoramento das estações SLMA (CIGALA/CALIBRA) e LSLZ (LISN) – ambas estão localizadas nas dependências do INPE em São Luís, distando entre si por aproximadamente seis metros. Tal comparação foi feita com o próprio software ISMR Query Tool, demonstrando-se a utilização dos recursos que foram disponibilizados à comunidade científica pela internet.



Figura 45 – Estações de monitoramento disponíveis na base de dados integrada (CIGALA/CALIBRA, LISN e ICEA).

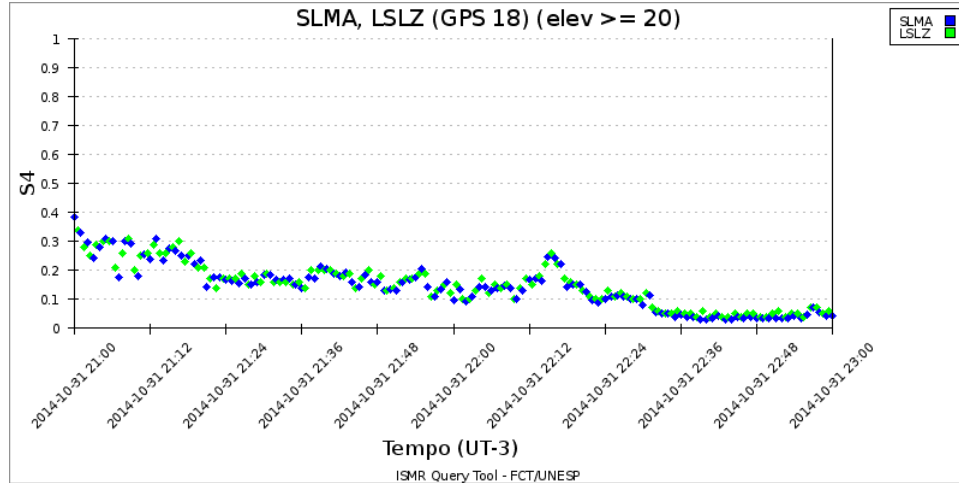


Figura 46 – Comparativo de dados da estação SLMA (CIGALA/CALIBRA) e LSLZ (LISN). Dados obtidos para o satélite GPS 18 no dia 31 de Outubro de 2014.

5.2.2 Mapas de Cintilação Observados

Dados de índice S4 das três redes de monitoramento integradas na base de dados foram utilizados para a definição de mapas cintilação observados. Na metodologia adotada para a geração dos mapas, o modelo de camada simples da ionosfera foi utilizado (admitindo-se a altitude base da camada ionosférica $h_i=350$ km). Uma grade espaço-temporal foi definida para acumular os valores de índice S4 projetados na região do IPP (a notação $S4_{IPP}$ será utilizada daqui em diante para denotar os valores de S4 projetados no IPP conforme a trajetória de propagação inclinada (*slant*)). Considerando a resolução espacial, de maneira similar a trabalhos anteriores (por exemplo, Spogli et al. (2009), Alfonsi et al. (2011)), define-se uma vizinhança para células desta grade, como por exemplo, $1^\circ \times 1^\circ$ (o que equivale a aproximadamente 111 km x 111 km, desprezando-se a curvatura da terra). Considerando também a resolução temporal, define-se um período de tempo, por exemplo, cinco minutos ou uma hora – abordagem que também comparece em trabalhos anteriores, como em Rezende et al. (2007)).

Para ilustrar a utilização da grade de resolução espaço-temporal para valores projetados nos IPPs, um esquema é apresentado em duas etapas na Figura 47. Na Fig. 47a, a configuração da resolução espacial considerando um único instante t é apresentada. Considerando o cenário multi-constelação (GPS, GLONASS e Galileo, por exemplo), no instante t é possível que uma determinada célula da grade contenha dados rastreados por mais de um satélite – aspecto representado para os satélites A e B. Embora estes satélites sejam rastreados em diferentes direções, eles apresentam caminhos de propagação próximos entre si na região da ionosfera, e, considerando a resolução espacial da grade, tem seus IPPs contidos na mesma célula. No esquema apresentado na Fig. 47b, introduz-se também a resolução temporal de cinco minutos. Neste caso, os valores são acumulados nas células

considerando as resoluções espacial e temporal concomitantemente. No detalhamento para os mesmos satélites A e B da Fig. 47a, observa-se ainda que a mudança de geometria de propagação do sinal ao longo do tempo pode acarretar que valores de IPPs sejam projetados em diferentes células da grade no período de tempo adotado. Destaca-se também que, para o caso de estações de monitoramento próximas entre si, uma mesma célula da grade espaço-temporal pode receber dados provenientes de pares receptor-satélite diferentes.

Os valores de $S4_{IPP}$ acumulados dentro de uma determinada célula podem ser agregados para produzir um único valor representativo para a mesma. Diferentes funções de agregação podem ser utilizadas, por exemplo, a média, desvio-padrão, mínimo, máximo, quantidade absoluta ou relativa (probabilidade) de valores acima (ou abaixo) que determinado limiar, dentre outras.

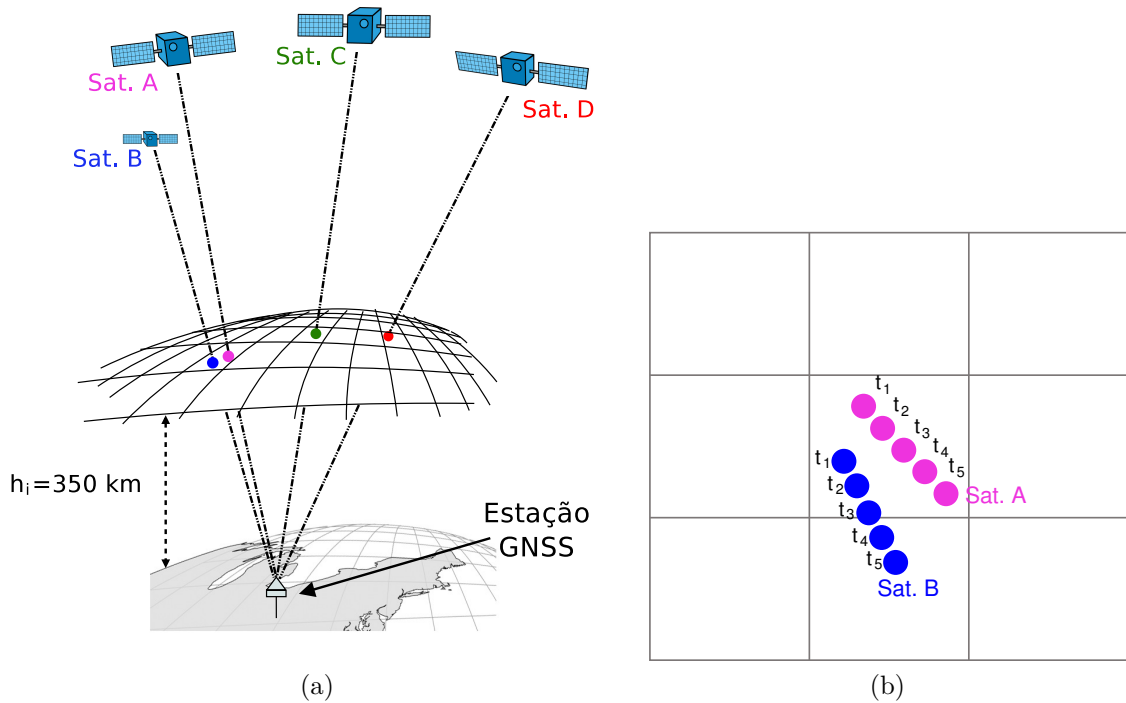


Figura 47 – (a) IPPs projetados em células de uma grade considerando uma única época t e exibindo um caso em que uma mesma célula contém IPPs provenientes de dois satélites diferentes (satélites A e B); (b) Detalhamento para projeção dos IPPs dos satélites A e B considerando uma resolução temporal de cinco minutos (t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5).

Com base nestes aspectos, a metodologia para definição dos mapas de cintilação observada pode ser sumarizada em três etapas:

- (a) Seleção de dados de entrada: dados de índice S4 provenientes de satélites GPS, GLONASS e Galileo (conforme a disponibilidade no *firmware* de cada receptor) são recuperados da base de dados integrada. De maneira similar aos trabalhos anteriores destacados na literatura, a representação pelo modelo de camada simples da ionosfera foi utilizada. As amostras de índice S4 foram projetadas nos IPPs ($S4_{IPP}$). Com o

objetivo de evitar possíveis efeitos de multicaminhamento dos sinais (os quais podem inflar o valor do índice S4), uma máscara de elevação de 20° foi aplicada³;

- (b) Cálculo da média espaço-temporal: os valores projetados nos IPPs são acumulados em células de uma grade de resolução definida. Com esta abordagem, dados de diferentes constelações e rastreados por diversas estações de monitoramento podem ser acumulados e utilizados para a representação do fenômeno em questão. Considerando a densidade de cobertura dos dados de monitoramento, a resolução espacial de 1°x1° (latitude/longitude) foi adotada. Visando também reduzir a numerosidade dos mapas (que normalmente são apresentados minuto a minuto), bem como visando considerar as diferenças entre os sistemas de tempo nos receptores da rede LISN e demais receptores, uma agregação temporal de cinco minutos foi utilizada, a qual representa uma redução de 80% na numerosidade dos mapas. A notação $S4_{GRD\{1^\circ \times 1^\circ; 5 \text{ min.}\}}$ representa o acúmulo de valores de $S4_{IPP}$ em uma célula da grade espaço-temporal, onde 1°x1° define a vizinhança espacial adotada e 5 minutos define a vizinhança temporal. A agregação pela média foi aplicada sobre os valores acumulados em cada célula da grade. Esta média pode ser interpretada como um indicador espaço-temporal, de maneira similar ao conceito apresentado em Ohashi e Torgo (2012);
- (c) Interpolação: após a agregação pela média na vizinhança espaço-temporal, uma interpolação foi utilizada para preencher lacunas devido à distribuição irregular dos IPPs e melhorar a representação gráfica do mapa. A interpolação baseada no método de inverso da distância foi adotada (PEBESMA, 2004; GRALER; PEBESMA; HEUVELINK, 2016). Adota-se a notação para $S4_{GRDI\{1^\circ \times 1^\circ; 5 \text{ min.}\}}$ para indicar atributos obtidos na grade interpolada com as resoluções espacial e temporal indicadas.

A Figura 48 representa graficamente, com dados de monitoramento, os passos para a geração dos mapas observados. Primeiramente, são obtidos todos os valores de índice S4 projetados nos IPPs no intervalo de tempo adotado de cinco minutos (Fig. 48a). Para uma visualização mais detalhada, uma representação aproximada (*zoom*) na região Nordeste foi aplicada na Fig. 48b. Observa-se que a mudança de geometria do satélite leva à observação de cinco estimativas de índice S4 que aparecem como um rastro no mapa para cada par satélite-receptor. Em seguida, calcula-se a média dos valores de S4 em cada célula da grade de resolução definida, obtendo os indicadores espaço-temporais Média($S4_{GRD\{1^\circ \times 1^\circ; 5 \text{ min.}\}}$) (Fig. 48c). Por fim, aplica-se a interpolação para a obtenção da representação gráfica final e dos valores interpolados Média($S4_{GRDI\{1^\circ \times 1^\circ; 5 \text{ min.}\}}$), conforme pode ser observado na Fig. 48d.

³ Nota-se que, no Capítulo 4, devido à constelação limitada de satélites transmitindo o sinal L2C, uma máscara de elevação menor (10°) foi utilizada. Neste capítulo, como não há limitação de constelação envolvida, adotou-se um valor mais conservador para a máscara de elevação (20°).

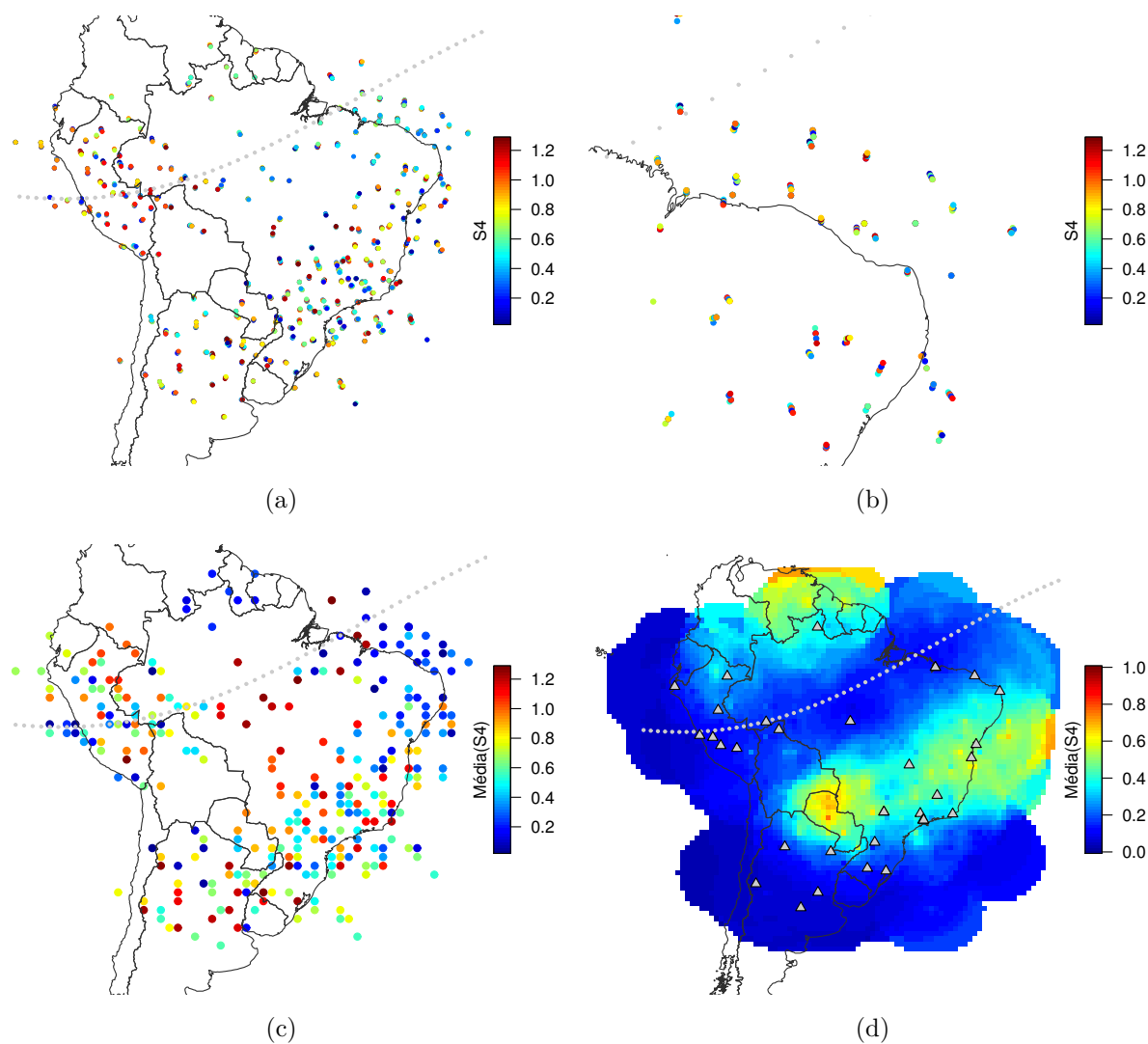


Figura 48 – Passos para a geração dos mapas observados: (a) valores de índice S4 projetados no IPP ao longo de cinco minutos; (b) representação aproximada (*zoom*) na região Nordeste para melhor visualização da etapa apresentada em (a); (c) cálculo da média dos valores acumulados em cada célula de resolução definida; (d) interpolação para obtenção da representação gráfica final e exibição das estações de origem dos dados.

A função de agregação pela média foi adotada para a geração dos mapas de cintilação observados, ou seja, os mapas observados constituem a média do índice S4 como descritores espaço-temporais. De maneira similar, outras funções de agregação podem ser utilizadas para produzir mais tipos de mapa, por exemplo, máximo e desvio-padrão.

A Figura 49 apresenta um comparativo entre os mapas de média (Fig. 49a), máximo (Fig. 49b) e desvio-padrão (Fig. 49c) do índice S4, considerando para os três casos a resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ e a resolução temporal de cinco minutos.

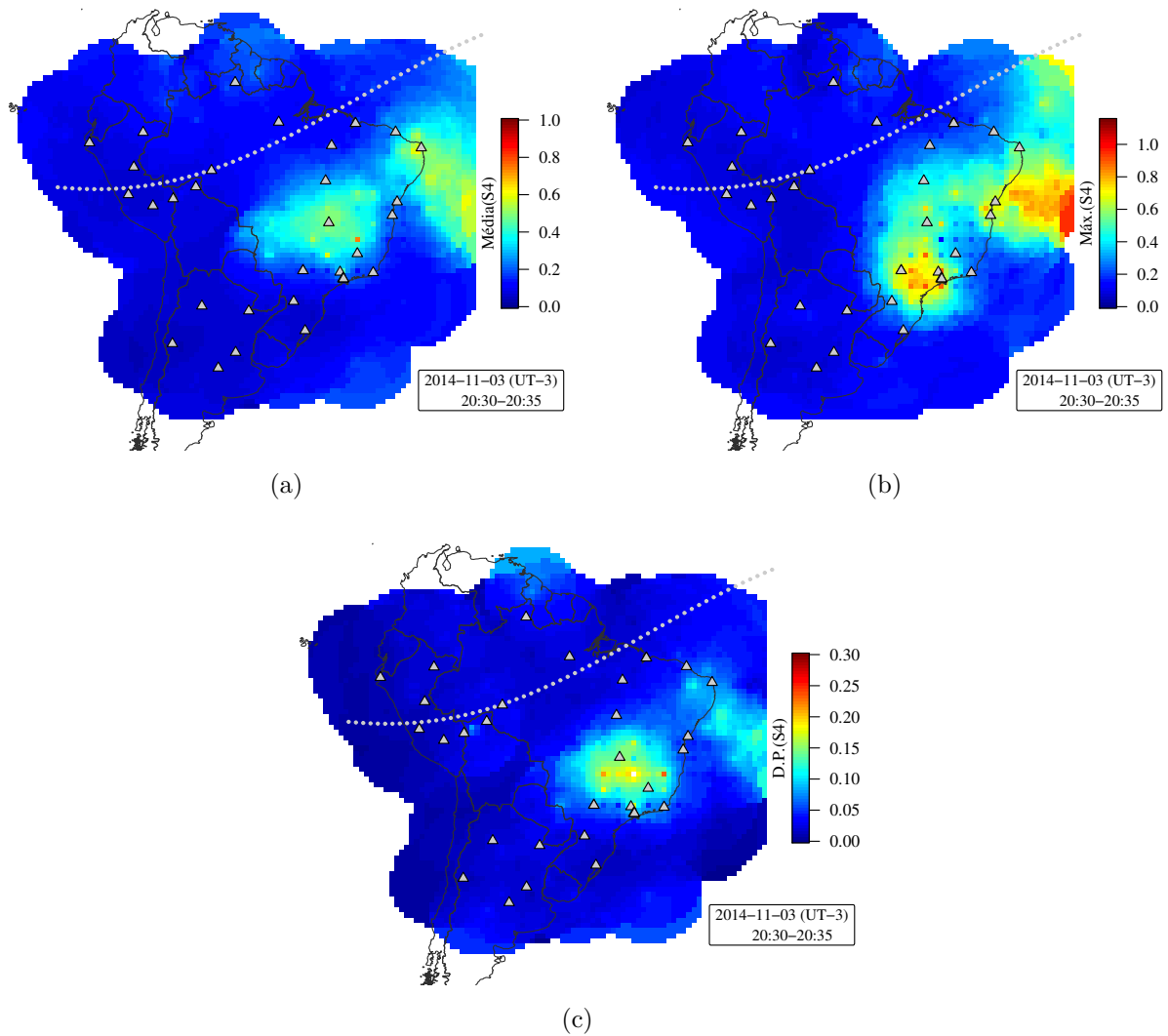


Figura 49 – Comparação entre diferentes funções de agregação: (a) média; (b) máximo; (c) desvio-padrão. Mapas para a noite de 03 de Novembro de 2014, para às 20:30 (UT-3).

Neste trabalho, adotou-se os mapas de S4 médio observado para representar o cenário de cintilação conforme registrado pelas estações de monitoramento, proporcionando a potenciais usuários a identificação dos horários e regiões afetadas. Os mapas observados também são posteriormente considerados modelos de referência para comparações com os mapas preditos (modelo preditivo – subseção 5.2.3).

A Figura 50 apresenta uma sequência de exemplos de mapas de cintilação observada para o dia 30 de Outubro de 2014. São apresentados seis mapas, respectivamente, para 18:30, 19:30, 20:30, 21:30, 22:30 e 23:30 (UT-3). Pode-se notar a ocorrência de cintilações na região nordeste mais cedo, bem como o padrão evolutivo na região da anomalia equatorial no decorrer da noite (acompanhando o terminador do dia para a noite). Este padrão evolutivo ao longo do tempo agrega as informações cujo potencial pode ser utilizado no desenvolvimento de modelos preditivos, conforme destacado em Shume e Mannucci (2013).

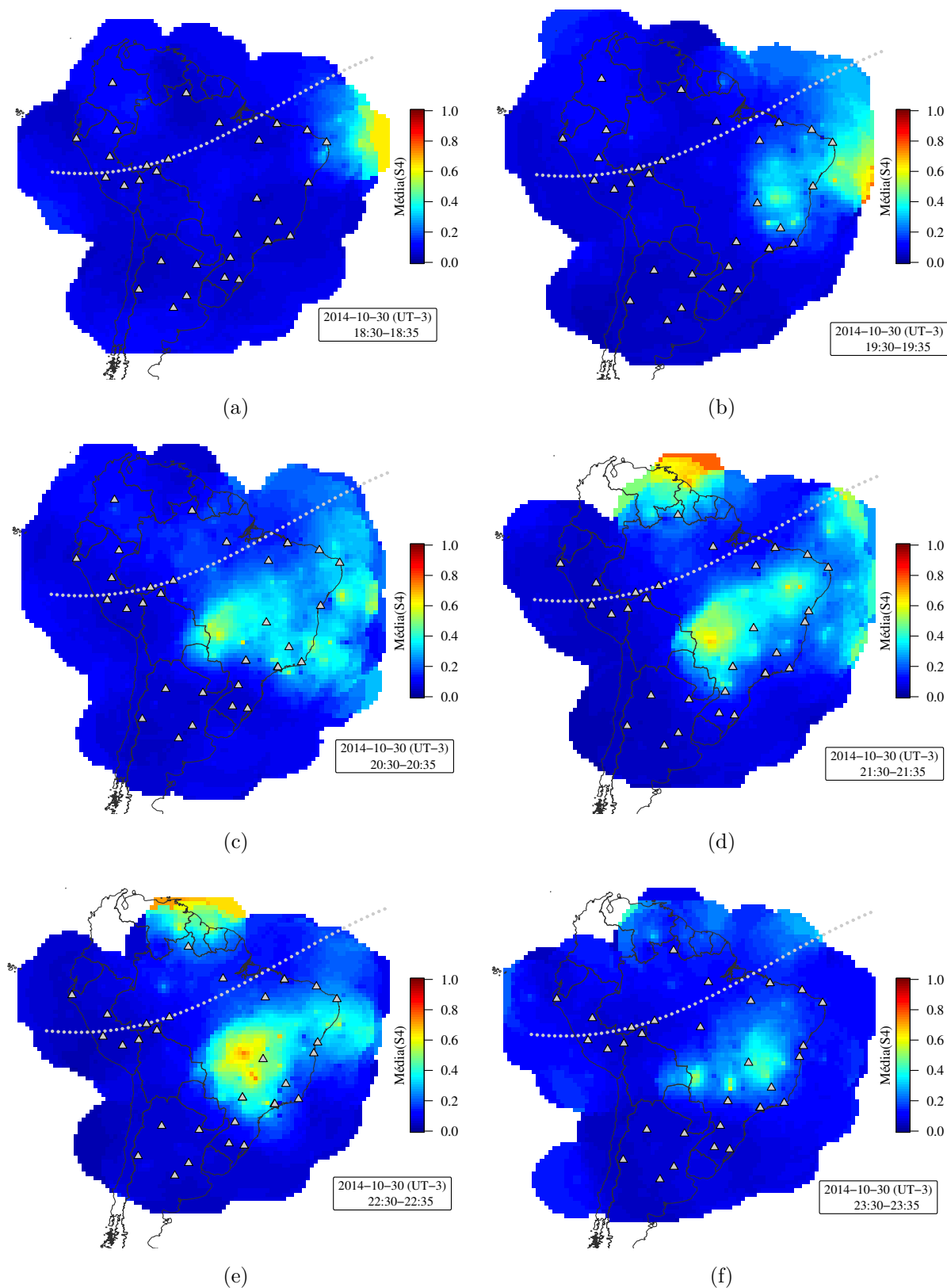


Figura 50 – Mapas de cintilação para a noite de 30 de outubro de 2014, para às 18:30 (a), 19:30 (b), 20:30 (c), 21:30 (d), 22:30 (e) e 23:30 (f), todos no tempo UT-3.

5.2.3 Modelo Preditivo e Mapas de Cintilação Preditos

Neste trabalho foi investigado o uso de mineração de dados preditiva para o desenvolvimento de um modelo de predição de cintilação baseado em Rede Neural Artificial (RNA).

A mineração de dados (*data mining*) consiste na extração de informações em grandes volumes de dados. As tarefas envolvidas no processo de mineração de dados podem caracterizar a mineração como descritiva ou preditiva. Quando o objetivo principal é caracterizar os dados identificando suas propriedades principais, tem-se a mineração descritiva, cujo objetivo principal é a descoberta de conhecimento. Já mineração preditiva é caracterizada quando o objetivo principal é realizar inferências sobre dados com o objetivo de se prever comportamentos futuros. As inferências são obtidas com o reconhecimento de padrões nos dados existentes, os quais poderão subsidiar as futuras decisões. Observa-se que mineração descritiva e preditiva são complementares. Usualmente, a mineração descritiva é realizada previamente à mineração preditiva, em um cenário onde as informações existentes ainda são insuficientes para realizar predições (WEISS; INDURKHYA, 1998; HAN; KAMBER, 2006).

5.2.3.1 Rede Neural Artificial

Uma das principais abordagens de mineração de dados preditiva é a Rede Neural Artificial. Tal abordagem tem inspiração na neurobiologia, e tenta reproduzir, de certa forma, métodos de processamento empregados pelo cérebro humano. As redes neurais podem ser aplicadas em tarefas de classificação e regressão, as quais incluem as predições em séries temporais. Trata-se de uma abordagem que pode ser considerada como uma extensão a outras abordagens preditivas, tais como a regressão linear múltipla ou regressão não-linear, uma vez que pode ser empregada tanto em problemas lineares quanto não-lineares (SAMARASINGHE, 2006).

Diversos tipos de redes neurais podem ser definidos, os quais apresentam características peculiares quanto à organização dos seus elementos mais simples – os neurônios. A Figura 51 apresenta a estrutura básica de um neurônio artificial. Neste exemplo, admite-se quatro sinais de entrada (e_1 , e_2 , e_3 e e_4), os quais são ponderados e acumulados pelo neurônio (somados – Σ). Em seguida, os valores somados são processados por uma função de ativação ($f(\Sigma)$ – também denominada função de transferência) para produzir uma saída.

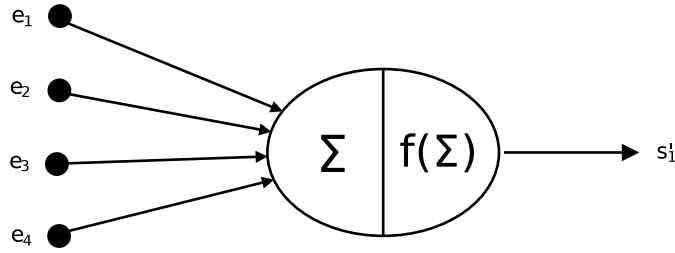


Figura 51 – Elemento básico de uma rede neural: neurônio. Baseado em Samarasinghe (2006, p.17).

Um exemplo de neurônio similar ao da Figura 51 é apresentado na Figura 52, desta vez acompanhado por valores numéricos para demonstrar o processamento do mesmo. Considerando quatro atributos de entrada com seus respectivos valores (e_i), os respectivos pesos (p_i), bem como a seguinte função de ativação $y = f(v)$:

$$f(v) = \begin{cases} 0, & \text{se } v < 0 \\ 1, & v \geq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Primeiramente, obtém-se a soma dos valores de entrada e_i ponderados pelos pesos p_i . Esta soma ponderada (representada pelo termo v daqui em diante) é denominada potencial de ativação do neurônio por Silva, Spatti e Flauzino (2010). Considerando os valores numéricos apresentados na Figura 52, obtém-se o seguinte potencial de ativação:

$$v = \sum_{i=1}^4 p_i \cdot e_i = (1)1,2 + (0,1)0,3 + (2)0,5 + (-0,5)2,3 = 1,08 \quad (5.2)$$

Aplicando-se a função de ativação ($f(v)$ – Equação 5.1), obtém-se a saída do processamento do neurônio, $f(1,08) = 1$.

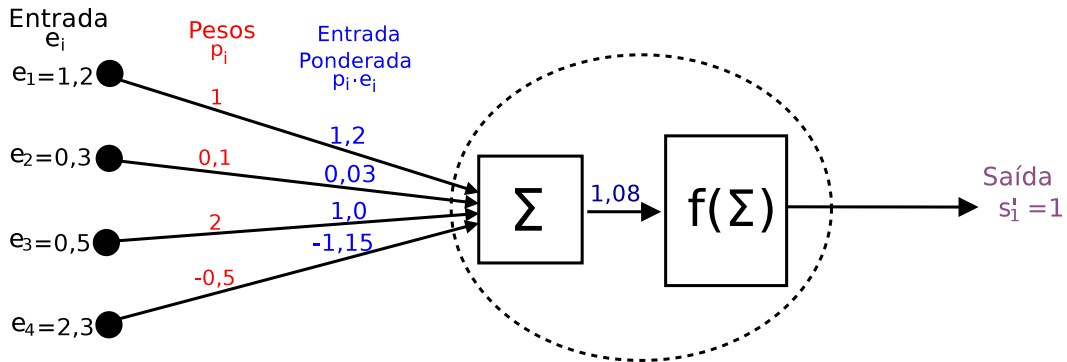


Figura 52 – Processamento em um neurônio. Baseada em Samarasinghe (2006, p.17).

Destaca-se que, com apenas um neurônio, pode-se resolver problemas lineares. Alguns modelos baseados em arranjos de neurônios são destacadas na literatura. Um

exemplo é o Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC – ou *Multilayer Perceptron* (MLP) na denominação em inglês) – um dos modelos mais utilizados em tarefas de classificação e predição para problemas lineares ou não-lineares (SAMARASINGHE, 2006; ARTERO, 2009).

Um exemplo de PMC é apresentado na Figura 53. Tal modelo possui uma camada de entrada – a qual admite quatro parâmetros (e_i , $i = 1, \dots, 4$) – uma camada oculta com cinco neurônios (NO_j , $j = 1, \dots, 5$) e uma camada de saída com um neurônio (NS_1) levando a um atributo de saída (s'_1). As camadas são conectadas entre si por dois conjuntos de pesos (convencionalmente referidos como pesos “ p^o ” – que conectam os neurônios da camada de entrada aos neurônios da camada oculta – e pesos “ p^s ”, que conectam os neurônios da camada oculta aos neurônios da camada de saída).

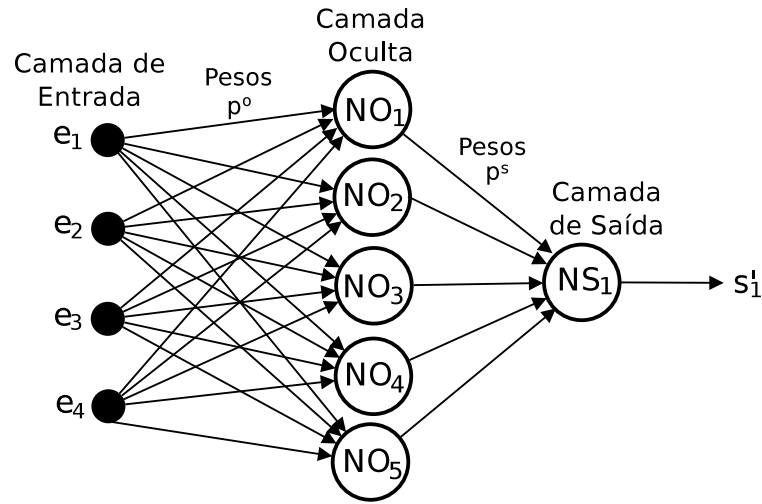


Figura 53 – Modelo de rede neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC).

Um passo-a-passo para o processamento considerando o PMC da Figura 53 é apresentado a seguir, sendo baseado em aspectos teóricos apresentados em Samarasinghe (2006), Artero (2009) e Silva, Spatti e Flauzino (2010).

A camada de entrada não processa os dados, apenas os distribui. Primeiramente, os atributos de entrada são ponderados pelos pesos p^o e transmitidos aos neurônios da camada oculta. Logo, para cada valor de entrada e_i ($i = 1, \dots, 4$) e cada neurônio da camada oculta NO_j ($j = 1, \dots, 5$), efetua-se o cálculo do respectivo potencial de ativação v_j^o :

$$v_j^o = \sum_{i=1}^4 (p_{i,j}^o)(e_i) \quad (5.3)$$

onde $p_{i,j}^o$ refere-se ao peso que conecta o atributo e_i ao neurônio NO_j .

Na sequência, os valores acumulados (potenciais de ativação v_j^o) são processados pela função de transferência ($f(v_j^o)$) para produzir os resultados da camada oculta.

Os resultados da camada oculta ($f(v_j^o)$) são ponderados pelos pesos p^s e enviados à camada de saída no próximo passo. Calcula-se o potencial de ativação v_1^s para o neurônio NS_1 da camada de saída:

$$v_1^s = \sum_{j=1}^5 (p_{j,1}^s)(f(v_j^o)) \quad (5.4)$$

onde $p_{j,1}^s$ refere-se ao peso que conecta o neurônio da camada oculta NO_j ao neurônio da camada de saída NS_1 .

Finalmente, na camada de saída, o valor acumulado (potencial de ativação v_1^s) é processado pela função de transferência ($f(v_1^s)$), produzindo a saída do modelo s_1' .

Várias configurações de redes PMC podem ser estabelecidas com a aplicação de diferentes configurações internas. No contexto da organização dos neurônios, por exemplo, pode-se adicionar mais camadas ocultas com quantidade variada de neurônios ou utilizar mais atributos na camada de saída. Pode-se alterar a conectividade entre os neurônios (totalmente conectados, como na Figura 53, ou parcialmente conectados). Pode-se também realizar alterações no fluxo dos sinais processados: no exemplo que foi apresentado na Figura 53, demonstra-se o processamento mais usual, com o fluxo adiante (setas para frente); outras opções podem ser utilizadas para incluir direções variadas de fluxo (SAMARASINGHE, 2006).

Uma outra configuração consiste na adição de camadas de viés (*bias*). A Figura 53 é redefinida na Figura 54 considerando a utilização deste tipo de recurso. Os neurônios em azul representam a utilização da camada de viés, na qual Θ^o indica os valores de viés para os neurônios da camada oculta e Θ^s indica o valor de viés para o neurônio da camada de saída.

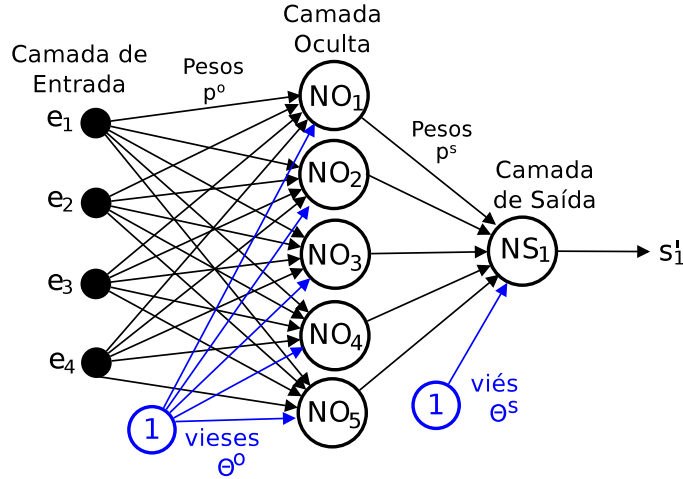


Figura 54 – Modelo de rede neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC) com camada de vieses.

Neste caso, considerando os neurônios da camada oculta (NO_j), pode-se reescrever a Equação 5.3 considerando os vieses θ_j^o :

$$v_j^o = \sum_{i=1}^4 (p_{i,j}^o)(e_i) + \theta_j^o \quad (5.5)$$

De maneira similar, reescreve-se a Equação 5.4 considerando o viés θ_1^s referente ao neurônio NS_1 :

$$v_1^s = \sum_{j=1}^5 (p_{j,1}^s)(f(v_j^o)) + \theta_1^s \quad (5.6)$$

No contexto da escolha da função de ativação, pode-se adotar a mesma função para todos os neurônios ou funções variadas. Algumas funções descritas na literatura são convencionalmente utilizadas nas redes neurais artificiais. Para o caso de problemas lineares, pode-se optar pela função de ativação linear $f(v) = v$. Para problemas não-lineares em redes PMC, normalmente utiliza-se funções de ativação do tipo logística (Equação 5.7) ou tangente hiperbólica (Equação 5.8). Estas funções tem domínio definido, conforme demonstrado na Figura 55: para a função logística, o domínio está contido no intervalo $[0, 1]$ (Fig. 55a); já a função tangente hiperbólica tem seu domínio no intervalo $[-1, 1]$ (Fig. 55b). Com este aspecto, restringe-se as saídas dos neurônios para os intervalos de domínio das funções, mesmo para os casos em que os potenciais de ativação v apresentem valores mais altos (ou mais baixos). Outro aspecto que justifica a escolha destas funções é que elas são diferenciáveis no seu domínio. Na etapa de ajuste dos pesos (que será discutida

adiante), é comum utilizar as derivadas das funções de ativação ($f'(v)$) Artero (2009), Silva, Spatti e Flauzino (2010).

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (5.7)$$

$$f(v) = \frac{1 - e^{-2v}}{1 + e^{-2v}} \quad (5.8)$$

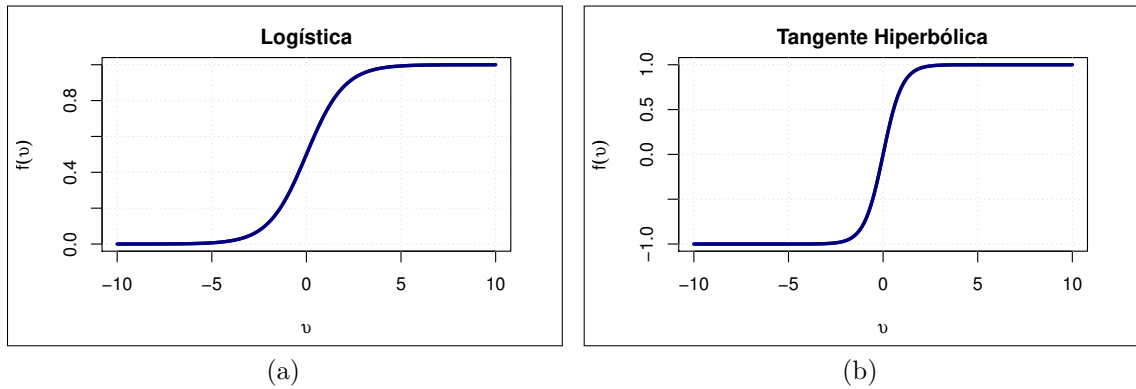


Figura 55 – Funções de ativação comumente utilizadas no PMC para problemas não-lineares: (a) função logística; (b) função tangente hiperbólica.

Ao processo de estabelecimento de pesos dá-se o nome de treinamento. Nesta etapa, utiliza-se um conjunto de dados cujos atributos de saída são conhecidos para proceder-se ao ajuste iterativo dos pesos. Neste caso, considerando o exemplo de PMC da Figura 54, são requeridos registros (também denominados tuplas) com valores de entrada e saída conhecidos (ou seja, valores de entrada e_1, e_2, e_3, e_4 com o respectivo valor de saída s_1 considerado verdadeiro). A quantidade de tuplas requerida para o ajuste dos pesos varia conforme o tipo de problema em questão. Melhores resultados são esperados se o conjunto de dados de treinamento apresenta cenários de entrada e saída variados, descrevendo o contexto esperado para a realização de predições quando a rede neural for aplicada (na fase de operação).

O algoritmo de treinamento mais utilizado para o PMC com fluxo adiante é o *back-propagation* (ou retro-propagação). Neste algoritmo, os erros obtidos pelo processamento de cada camada são retro-propagados pela rede neural para o efetivo ajuste dos pesos (RUMELHART et al., 1986).

Os passos para o *backpropagation* são sumarizados a seguir considerando a mesma rede apresentada na Figura 54 e seguindo metodologias apresentadas em Haykin (2004), Artero (2009) e Silva, Spatti e Flauzino (2010).

Em posse de r tuplas (tu) contendo atributos de entrada com valores de saída conhecidos, inicia-se o treinamento com a primeira tupla de dados (tu_1). O processo de

ajuste dos pesos é iniciado com a estimativa do erro obtido na camada de saída para esta tupla, etapa em que deve-se verificar a diferença entre o valor considerado verdadeiro (s_1) e o valor predito pela rede PMC (s'_1). No algoritmo *backpropagation*, utilizam-se as estimativas de gradientes de erro, os quais são posteriormente utilizados para atualizar os valores dos pesos dos neurônios. A utilização dos gradientes de erro permite ao algoritmo manter uma estabilidade considerando a rede como um todo ao longo do treinamento (HAYKIN, 2004). Para a estimativa do gradiente de erro δ_1^s para o neurônio NS_1 da camada de saída, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$\delta_1^s = (s_1 - s'_1)(f'(v_1^s)) \quad (5.9)$$

Em seguida, pode-se calcular os gradientes de erros δ_j^o para cada neurônio NO_j da camada oculta. A seguinte expressão pode ser utilizada:

$$\delta_j^o = (f'(v_j^o))(\delta_1^s)(p_{j,1}^s) \quad (5.10)$$

Com base nos erros estimados, procede-se à atualização dos pesos e vieses. Nesta etapa, utiliza-se uma taxa de aprendizado η_l adotada (normalmente adota-se um valor baixo, como exemplo $\eta_l = 0,01$). Utilizando-se a notação algorítmica de atribuição ($\leftarrow$) para representar a atualização dos pesos para uma próxima iteração, para a camada de saída, tem-se:

$$p_{j,1}^s \leftarrow p_{j,1}^s + \eta_l(\delta_1^s)(f(v_j^o)) \quad (5.11)$$

$$\Theta_1^s \leftarrow \Theta_1^s + \eta_l(\delta_1^s) \quad (5.12)$$

Para a camada oculta, tem-se:

$$p_{i,j}^o \leftarrow p_{i,j}^o + \eta_l(\delta_j^o)(e_i) \quad (5.13)$$

$$\Theta_j^o \leftarrow \Theta_j^o + \eta_l(\delta_j^o) \quad (5.14)$$

Por fim, calcula-se o erro da rede para a tupla processada. Utiliza-se a expressão definida na Equação 5.15, que define o valor instantâneo da energia do erro para o neurônio (HAYKIN, 2004). Considerando a r -ésima tupla de dados (tu_r), obtém-se:

$$E(tu_r) = \frac{1}{2}(s_1 - s'_1)^2 \quad (5.15)$$

Verifica-se que o treinamento consiste em várias etapas, as quais, em resumo, abrangem um ciclo de processamento de dados de entrada, comparação dos valores de saída preditos com valores de saída conhecidos e ajuste dos pesos. Estas etapas são sumarizadas em passos constituindo o algoritmo *backpropagation*. Em síntese, conforme sugerido em Artero (2009), os seguintes passos são descritos:

1. Inicialização da rede neural com pesos aleatórios;
2. Aplicação das entradas e_i ponderadas pelos pesos $p_{i,j}^o$ e somadas aos vieses Θ_j^o (Equação 5.5) para o cálculo dos potenciais de ativação da camada oculta (v_j^o);
3. Aplicação da função de transferência sobre os potenciais de ativação da camada oculta ($f(v_j^o)$);
4. Utilização da saída da camada oculta ponderada pelos pesos $p_{j,1}^s$ e somadas aos vieses Θ_1^s (Equação 5.6) para o cálculo dos potenciais de ativação da camada de saída (v_1^s);
5. Aplicação da função de transferência sobre os potenciais de ativação da camada de saída ($f(v_1^s)$);
6. Cálculo do gradiente de erro δ_1^s da saída do modelo (Equação 5.9);
7. Cálculo do gradiente de erro δ_j^o dos neurônios da camada oculta (Equação 5.10);
8. Ajuste dos pesos da camada de saída (Eqs. 5.11 e 5.12);
9. Ajuste dos pesos da camada oculta (Eqs. 5.13 e 5.14);
10. Estimativa do erro da rede neural para a tupla processada (Equação 5.15).

Os passos 2 a 10 são realizados para todas as tuplas do conjunto de treinamento e são repetidos até que um critério de parada seja atingido. Este critério pode ser, por exemplo, a verificação do erro médio de treinamento. Considerando todas as r tuplas do conjunto de treinamento, o erro médio do treinamento é expresso por:

$$EM(Tr) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r E(tu_i) \quad (5.16)$$

Pode-se definir o critério de parada se o valor de $EM(Tr)$ atende a um determinado limiar de qualidade ε_{Tr} desejado, ou seja, repete-se todo o processo de treinamento (passos

2 a 10) até que se obtenha $EM(Tr) \leq \varepsilon_{Tr}$. Pode-se também considerar um número máximo de iterações $Ite_{(Tr)}$ para interromper o processo caso o limiar não seja alcançado (ARTERO, 2009; HAYKIN, 2004). Outro critério de parada pode ser a variação dos gradientes de erro (Eqs. 5.9 e 5.10), neste caso, repete-se o treinamento até que todos os valores absolutos de gradientes de erro sejam menores que um limiar ε_δ adotado considerando duas iterações consecutivas (HAYKIN, 2004; FRITSCH; GUENTHER, 2016).

Destaca-se que versões modificadas do algoritmo *backpropagation* são descritas na literatura, como o *backpropagation* resiliente. Nesta versão modificada do algoritmo, utiliza-se a variação do sinal dos gradientes de erro entre iterações sucessivas para incrementar a taxa de aprendizagem n_l dinamicamente. Esta estratégia permite uma convergência mais rápida dos pesos se comparada ao algoritmo tradicional (RIEDMILLER; BRAUN, 1993; SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

5.2.3.2 Validação cruzada

No treinamento de redes neurais, é comum a utilização de uma estratégia para testar e validar o desempenho da rede neural antes de torná-la operacional. A estratégia mais comum é denominada validação cruzada (ou *cross-validation*). Nesta estratégia, pode-se dividir o conjunto de dados de treinamento aleatoriamente em dois subconjuntos. O primeiro subconjunto – denominado subconjunto de estimativas – é utilizado de fato para ajuste dos pesos. O segundo subconjunto – denominado subconjunto de testes – é utilizado para testar o desempenho da rede e validar (ou não) os pesos ajustados. Na formação dos subconjuntos, a maior parte das tuplas é reservada para o treinamento, por exemplo, 80% do total, enquanto a parte menor (20%) é reservada para o teste. Desta forma, pode-se verificar o desempenho da rede treinada com um conjunto de dados diferente do utilizado para ajustar os pesos. Esta estratégia também permite reduzir a possibilidade de super-treinamento do modelo – situação em que os pesos são ajustados demais ao conjunto de treinamento, fazendo com que a rede perca a sua capacidade de generalização para outros conjuntos de dados (HAYKIN, 2004; FERREIRA et al., 2017).

Para a validação do modelo, pode-se avaliar o comportamento dos resíduos do modelo, isto é, a comparação entre os valores de saída conhecidos (s_1) com os valores de saída preditos (s'_1). Para cada tupla n do subconjunto de testes, os resíduos são calculados pela expressão:

$$e[n] = (s_1[n] - s'_1[n]) \quad (5.17)$$

onde $s_1[n]$ e $s'_1[n]$ referem-se, respectivamente, aos valores conhecidos e preditos considerando a n -ésima tupla do subconjunto de testes.

Para avaliar o resultado considerando todo o subconjunto de testes, pode-se avaliar, por exemplo, a raiz do erro-médio-quadrático dos resíduos ($REMQ(e)$). Considerando o total de n tuplas no subconjunto de testes, obtém-se:

$$REMQ(e) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e[i]^2} \quad (5.18)$$

Em síntese, os seguintes passos são realizados na validação cruzada:

1. Divisão aleatória do conjunto de dados (subconjunto de estimativas com 80% das tuplas e subconjunto de testes com 20%);
2. Treinamento da rede neural com o subconjunto de estimativas;
3. Verificação do desempenho da rede neural com o subconjunto de testes (por exemplo, pela análise da raiz do erro-médio-quadrático dos resíduos – Equação 5.18).

Pode-se repetir os passos acima até que o desempenho da rede neural atenda um determinado critério de qualidade desejado (ε_V), ou seja, repete-se os passos de 1 a 3 até que $REMQ(e) \leq \varepsilon_V$. Um número máximo de iterações $Ite_{(V)}$ também pode ser utilizado para caso o critério não seja satisfeito. Neste caso, a rede neural que apresentar o menor valor de $REMQ(e)$ ao longo das iterações é adotada.

Após o treinamento, os pesos obtidos são considerados como as melhores estimativas dos parâmetros do modelo, podendo ser utilizados para aplicações de classificação e regressão para conjuntos de dados cuja saída é desconhecida (etapa de operação da rede neural artificial). Destaca-se que, além do PMC, outras configurações de redes neurais podem ser adotadas para problemas relacionados a séries temporais. Dentre as configurações, destacam-se as redes neurais recorrentes – na qual a saída da rede se torna um atributo de entrada adicional na predição da próxima época – e as redes neurais múltiplas – nas quais várias estruturas de redes neurais podem ser combinadas com diferentes propósitos intermediários (SAMARASINGHE, 2006).

Em aplicações de abordagens de mineração de dados preditiva (tais como as redes neurais) considerando o contexto de dados de séries temporais, tem-se que os conjuntos de dados utilizados no treinamento – bem como nos testes e validação do modelo preditivo – são aqueles até então disponíveis. Este cenário é representado no Quadro 5.1. Considerando um conjunto de dados de múltiplas variáveis ($A, B, \dots, Z$) obtidas ao longo do tempo, os dados disponíveis para o treinamento, testes e validação do modelo preditivo são aqueles obtidos até a época atual t . O modelo pode ser aplicado para predição de atributos compreendidos no tempo futuro, os quais estão, portanto, indisponíveis.

Tempo		Observações					
		Época	A	B	...	...	
		1	a_1	b_1	...	...	
	Observações disponíveis	2	a_2	b_2	...	...	Treinamento, Testes e Validação
		...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	
		t	a_t	b_t	...	...	
	Observações Indisponíveis (futuro)	t + 1	a_{t+1}	b_{t+1}	...	...	Aplicação do Modelo (Predições)
		...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	
		t+n	a_{t+n}	b_{t+n}	...	...	

Quadro 5.1 – Conjuntos de treinamento e testes considerando dados de séries temporais. Baseado em Weiss e Indurkha (1998).

5.2.3.3 Atributos de entrada e saída do modelo preditivo

Neste trabalho, o conceito de indicadores espaço-temporais foi utilizado no desenvolvimento do modelo que tem a finalidade de produzir mapas de predição de cintilação para uma determinada noite, com antecedência de 1 a 4 horas. Variáveis de entrada para o modelo preditivo foram adotadas considerando os domínios temporal e espacial dos dados simultaneamente (OHASHI; TORGO, 2012). De maneira similar aos mapas de cintilação observada, a representação de camada simples da ionosfera e a projeção de IPPs foram utilizadas.

Dados de monitoramento de cintilação (obtidos da base de dados integrada) foram utilizados para definir o modelo preditivo baseado em rede neural artificial. Para definição dos atributos de entrada do modelo, foram utilizadas observações de monitoramento coletadas no começo da mesma noite de interesse (logo após o horário do pôr-do-sol local) e também em noites anteriores. Logo, seu domínio sugerido de aplicação acompanha as variações no horário do pôr-do-sol ao longo do ano. Considerando o período de testes de aplicação do modelo (cujos resultados serão apresentados na subseção 5.2.4), considerou-se a realização de predições a partir das 19:30 (no horário UT-3). Com este aspecto, o modelo preditivo pode extrair informações das estações mais a leste na região equatorial logo após o pôr-do-sol para geração dos mapas preditos para o restante da noite.

De maneira similar à metodologia utilizada para definição dos mapas de cintilação observados, foram utilizados valores acumulados em células de uma grade de resolução espacial e temporal definida, sobre os quais foram aplicadas diferentes funções de agregação (média, máximo e probabilidade) seguida da interpolação. O atributo alvo da predição (saída do modelo preditivo) é o índice S4 previsto considerando a mesma configuração dos mapas observados (ou seja, o modelo é designado a produzir um mapa de S4 médio similar

aos apresentados na subseção 5.2.2, mas com determinada antecedência).

Alguns termos são definidos na sequência para descrever os atributos de entrada e saída do modelo. É considerado que, em determinada noite n , há dados disponíveis até a época t , por exemplo, $t=19:30$. Logo, o modelo preditivo pode ser designado para obter predições a partir deste horário. Uma predição pode ser feita para uma época futura $t_p = t + h$, onde t_p é a época da predição e h é o tempo de antecedência (também denominado janela de predição).

Os atributos de entrada que foram adotados visam estabelecer, na época t , uma relação com o atributo de saída na época t_p . Esta associação é realizada no treinamento da rede neural (com dados de noites anteriores) e constitui a essência do modelo preditivo proposto. Foram utilizados cinco atributos no modelo preditivo, sendo quatro atributos de entrada (denominados e_1 a e_4) e um atributo de saída (denominado s'_1):

- Atributo e_1 :

$\text{Max}(S4_{GRDI}\{1^\circ \times 1^\circ; [t - w_r, t]\})$ (máxima cintilação recente): este atributo pode ser considerado como uma tentativa de representar a cintilação recente, ou seja, abrange as últimas informações coletadas na mesma noite na qual as predições serão realizadas. Considerando o domínio de aplicação do modelo, este atributo tem potencial de descrever o surgimento das irregularidades que causam as cintilações logo após o pôr-do-sol. Com o objetivo de capturar este padrão por meio de um indicador espaço-temporal, a função de agregação pelo valor máximo foi aplicada sobre os valores de $S4_{IPP}$ observados durante um período que antecede a última época (t) com dados disponíveis. Uma janela de tempo recente ($[t - w_r, t]$, onde w_r refere-se a um período adotado em minutos) foi utilizada para considerar os valores máximos de $S4$ observados. Este atributo permite relacionar a severidade das cintilações até então observadas com a severidade das cintilações esperadas para o restante da noite. O valor de $w_r=60$ minutos foi utilizado nos testes do modelo preditivo. Além desta resolução temporal de uma hora, a resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ (latitude/longitude) foi adotada para agregar os valores de $S4_{IPP}$ em cada célula da grade;

- Atributo e_2 :

$P(S4_{GRDI}\{1^\circ \times 1^\circ; [t_p - w_p, t_p + w_p]\} \geq l_{S4}, n)$ (probabilidade de ocorrência de cintilação na vizinhança espaço-temporal de t_p nas n noites anteriores): este atributo representa a probabilidade de ocorrência de cintilação em determinada região e horário, com base nos dados históricos obtidos em n noites anteriores. Um limiar l_{S4} deve ser adotado para o cálculo desta probabilidade. Com o objetivo de quantificar mesmo as cintilações mais fracas, o valor adotado $l_{S4}=0,3$ foi utilizado. Logo, em cada célula da grade, a probabilidade é calculada a partir da divisão da quantidade de $S4_{IPP} \geq 0,3$ pelo número de amostras de $S4_{IPP}$ pertencentes a esta célula. Este atributo visa

associar condições de local e horário similares às esperadas na época da predição (t_p). Para a consideração de condição similar de local, utilizam-se as informações coletadas nas mesmas células da grade de resolução definida durante n noites anteriores. Para condição similar de horário, utiliza-se uma vizinhança temporal em relação à época da predição (t_p) definindo-se um intervalo $[t_p - w_p, t_p + w_p]$, onde w_p refere-se a um período de tempo adotado para representar a vizinhança temporal. Nos experimentos realizados neste trabalho, adotou-se $n = 6$ e $w_p = 10$ minutos. Exemplificando com estes valores, considere o caso em que numa noite n às $t=19:30$ será feita uma predição para $t_p=21:30$ (janela de predição $h=2$ horas). Neste caso, a probabilidade de ocorrência seria calculada a partir dos dados obtidos nas seis noites anteriores ($n-1, n-2, \dots, n-6$) apenas nos horários definidos na vizinhança temporal adotada, ou seja, entre 21:20 e 21:40. Ao aumentar os valores de n e/ou w_p , esta variável preditora pode-se tornar menos específica. A escolha de $w_p = 10$ minutos foi feita visando absorver a variabilidade de horário de ocorrência de cintilação ao longo de dias sucessivos. De maneira análoga, a escolha de $n = 6$ dias foi adotada para permitir que o cálculo da probabilidade seja feito com razoável redundância e em condições similares de variação sazonal e de ciclo solar;

- Atributo e_3 :

$Lat_{GRDI}^{dip}\{1^\circ \times 1^\circ; t\}$ (latitude magnética): conforme destacado anteriormente (na subseção 2.3.3), as regiões mais afetadas pelas cintilações são compreendidas aproximadamente entre 10° e 20° ao Norte e ao Sul do equador magnético, compreendendo as cristas da anomalia de ionização equatorial. Logo, a latitude magnética (também denominada latitude de “dip”) foi utilizada como forma de associar as cintilações às localidades mais propícias de sua ocorrência. O modelo IGRF (THÉBAULT et al., 2015) foi utilizado para se calcular os valores de latitude magnética (Equação 2.13) na altitude $h_i = 350$ km para cada célula da grade;

- Atributo e_4 :

$\delta_{MagGRDI}\{1^\circ \times 1^\circ; t\}$ (declinação magnética): de maneira similar ao atributo anterior, a declinação magnética na altitude $h_i = 350$ km para cada célula da grade complementa a descrição espacial utilizada para descrever a ocorrência das cintilações e absorver a variação longitudinal da ocorrência de cintilações. O modelo IGRF também foi utilizado para a determinação da declinação magnética dos IPPs;

- Atributo s'_1 :

Média($S4_{GRDI}\{1^\circ \times 1^\circ; [t_p, t_p+5]\}$) (atributo alvo da predição): de maneira similar aos mapas de cintilação observada, o algoritmo é designado a produzir os mapas de cintilação esperada considerando a agregação pela média com resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ e resolução temporal de cinco minutos. O resultado de saída do modelo

preditivo pode então ser interpretado herdando as mesmas características dos mapas observados descritos na subseção 5.2.2.

Destaca-se que diferentes configurações de atributos foram objeto de investigação (por exemplo, a utilização de coordenadas geográficas, como em trabalhos anteriores, em detrimento às coordenadas magnéticas). Os atributos acima descritos apresentaram os melhores resultados e foram adotados no modelo preditivo.

Uma rede neural foi constituída utilizando o modelo PMC. Tipicamente, não há uma regra exata para definição da quantidade de neurônios. No modelo utilizado neste projeto, além dos quatro atributos na camada de entrada (atributos e_1, e_2, e_3, e_4), foi utilizada uma camada oculta (com sete neurônios) e um atributo na camada de saída (atributo s'_1). Uma representação gráfica do modelo adotado é apresentada na Figura 56. Destaca-se também que a configuração apresentada apresentou os melhores resultados durante testes com diferentes configurações de rede.

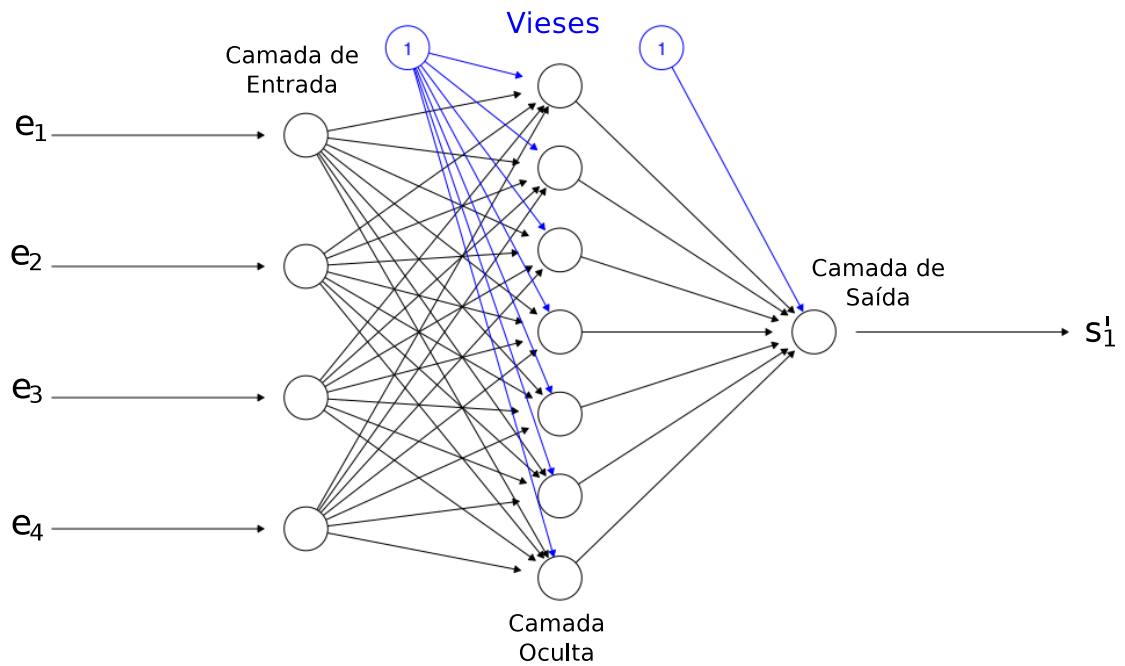


Figura 56 – Configuração de rede neural PMC utilizado no modelo preditivo.

5.2.3.4 Treinamento, Teste e Validação da Rede Neural

A rede neural foi definida na linguagem de programação e ambiente de desenvolvimento R (R Core Team, 2017), tendo destacado o uso do pacote “neuralnet” (FRITSCH; GUENTHER, 2016), que inclui rotinas automatizadas para treinamento de dados com o algoritmo *backpropagation* resiliente. Foi utilizada a função de transferência logística (Equação 5.7).

O treinamento da rede neural requer um conjunto de dados com valores de entrada e de saída conhecidos. No algoritmo proposto, optou-se por estabelecer conjuntos de dados de treinamento dinamicamente. Desta forma, realiza-se o processo de treinamento de acordo com as épocas t e t_p . As tuplas para o treinamento são obtidas dinamicamente junto à base de dados integrada. Ressalta-se que, para o caso de pós-processamento de dados, somente dados coletados até a época t podem ser utilizados no modelo, conforme esquema representado no Quadro 5.1.

Dados de três noites anteriores são selecionados para a formação do conjunto de dados de treinamento, herdando, portanto, condições similares de variação sazonal e de ciclo solar, as quais são levadas em conta em cada realização de treinamento (aspecto destacado no modelo de Machado e Junior (2013)). Além disso, estende-se o potencial de generalização da rede ao considerar a climatologia de cintilações em mais de uma noite. Eventuais dias caracterizados por inibição de cintilação não foram incluídos nos experimentos realizados (este aspecto será discutido adiante na seção 5.3).

A adoção de dados de três noites anteriores também permite que o tempo de processamento requerido para o treinamento da rede neural seja da ordem de 10 segundos (aproximadamente) – viabilizando, portanto, uma possível utilização do modelo para aplicações em tempo quase real. Ressalta-se que a quantidade de tuplas no conjunto de treinamento varia conforme a disponibilidade de dados e mudança de geometria dos IPPs. Considerando o período dos experimentos apresentados na subseção 5.2.4, tem-se aproximadamente 2000 tuplas em cada conjunto de treinamento.

Visando reduzir o tempo de convergência para o treinamento da rede, os atributos de entrada de latitude magnética e declinação magnética (e_3 e e_4) foram normalizados para estarem compreendidos no intervalo $[0, 1]$. Os demais atributos já variam entre aproximadamente 0 e 1 e não foram normalizados.

No treinamento com o *backpropagation* resiliente, foi utilizado o critério de parada baseado na variação do valor absoluto dos gradientes de erro entre iterações consecutivas. Adotou-se o critério $\varepsilon_\delta = 0,03$ ou um número máximo de mil iterações ($Ite_{(Tr)} = 1000$, ou seja, até mil repetições para todas as linhas do subconjunto de estimativas ou até que a variação do valor absoluto dos gradientes de erro em iterações consecutivas seja menor que $\varepsilon_\delta = 0,03$). O número de iterações necessário para atingir o critério varia conforme o relacionamento dos atributos no subconjunto de estimativas e os limiares envolvidos no treinamento. Cabe ressaltar que, se o número máximo de iterações do treinamento for atingido e o critério de parada ε_δ não for satisfeito, o processo de treinamento com este subconjunto de dados é abortado, sendo necessário o reinício do mesmo.

Uma representação gráfica para mostrar a convergência de uma rede neural durante o treinamento é apresentada na Figura 57. Para cada iteração, é exibido o critério de erro ε_δ obtido (em escala logarítmica para melhorar a visualização). Neste exemplo, o critério

$\varepsilon_\delta = 0,03$ foi atingido após 546 iterações.

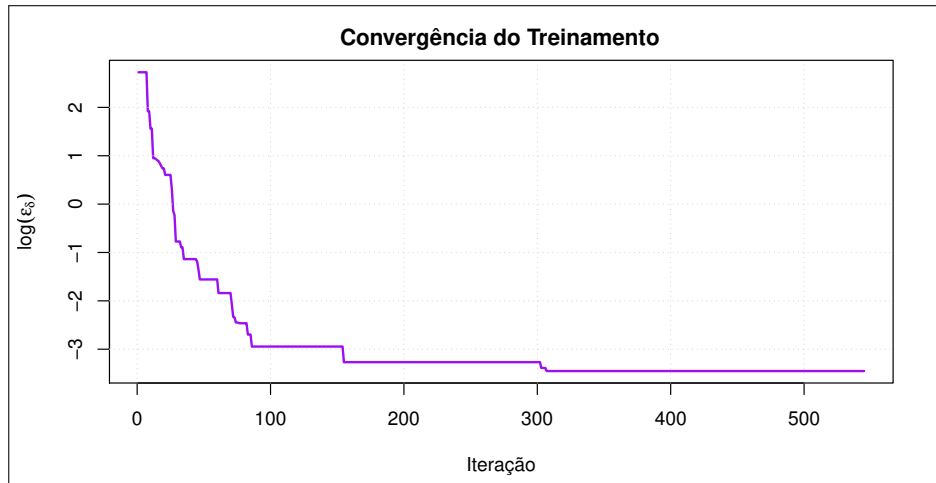


Figura 57 – Convergência da rede neural após iterações.

A abordagem de validação cruzada foi realizada, adotando-se a divisão de 80% para o subconjunto de estimativas dos pesos e 20% para o subconjunto de testes. Na validação cruzada, foi utilizado o critério $\varepsilon_V = 0,05$ (baseado no erro do subconjunto de testes $REM_Q(e)$ – Equação 5.18) ou um número máximo de cinco iterações ($Ite_{(V)} = 5$, ou seja, até cinco repetições do processo de validação cruzada até que se obtenha $REM_Q(e)$ menor que $\varepsilon_V = 0,05$). Se o critério ε_V adotado não é satisfeito, admite-se como resultado final a rede neural que apresentou o menor valor de $REM_Q(e)$ dentre as iterações da validação cruzada.

Após o treinamento, a rede neural é considerada operacional e pode ser utilizada para realizar as predições para a noite n (etapa de operação). Um novo conjunto de dados deve ser obtido para aplicação do modelo. Este conjunto de dados, denominado conjunto de aplicação, não dispõe de atributos de saída conhecidos, possuindo apenas os atributos de entrada (e_1, e_2, e_3 e e_4), os quais foram obtidos até a época t . Um esquema ilustrativo é apresentado na Figura 58, o qual mostra resumidamente as etapas até que a rede neural se torne operacional no contexto dos conjuntos de dados. O processo abrange a recuperação de dados de treinamento (oriundos de noites anteriores), a etapa de treinamento, a recuperação de dados de aplicação e a etapa de operação, na qual o modelo pode ser utilizado para realizar as predições.

Posteriormente à observação dos dados na época de predição t_p , pode-se obter indicadores de qualidade *a posteriori* com a comparação entre os mapas observados e os mapas preditos. Neste caso, considerando n células em comum aos dois mapas, as seguintes expressões podem ser utilizadas para obtenção do erro médio (Equação 5.19) e respectivo desvio-padrão (Equação 5.20):

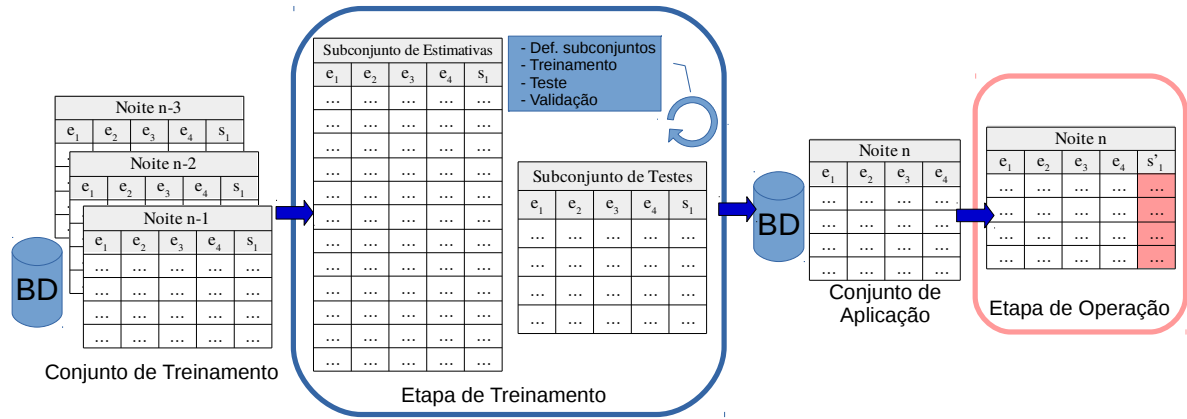


Figura 58 – Etapas envolvidas no contexto da recuperação de dados da base de dados integrada.

$$EM(Pr) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S4_{M_{obs}}^i - S4_{M_{Pr}}^i) \quad (5.19)$$

$$REMQ(Pr) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S4_{M_{obs}}^i - S4_{M_{Pr}}^i)^2} \quad (5.20)$$

Nas Eqs. 5.19 e 5.20, $S4_{M_{obs}}$ refere-se ao índice obtido na célula do mapa observado e $S4_{M_{Pr}}$ refere-se ao índice obtido na mesma célula do mapa predito.

Exemplos dos atributos de entrada (e_1 e e_2) e saída (s_1) para o conjunto de treinamento (com saídas conhecidas) são apresentados na Figura 59. O exemplo considera o caso $t=19:30$ e $t_p=21:30$ (janela de predição $h = 2$ horas). Os dados de treinamento são exibidos para a noite de 02/11/2014. Na Fig. 59a, apresenta-se o atributo e_1 , o qual foi obtido na noite de 02/11/2014 entre 18:30 e 19:30 (UT-3). Na Fig. 59b, apresenta-se o atributo e_2 , o qual foi obtido nas seis noites anteriores (entre 26/10/2014 e 01/11/2014) considerando apenas os horários na vizinhança da época de predição t_p (entre 21:20 e 21:40). Na Fig. 59c, apresenta-se o atributo de saída (s_1), S4 médio obtido para a época $t_p, t_p + 5$ (entre 21:30 e 21:35). Observa-se que os atributos descrevem a relação da variação de horário local acompanhada da variação espacial de ocorrência das cintilações.

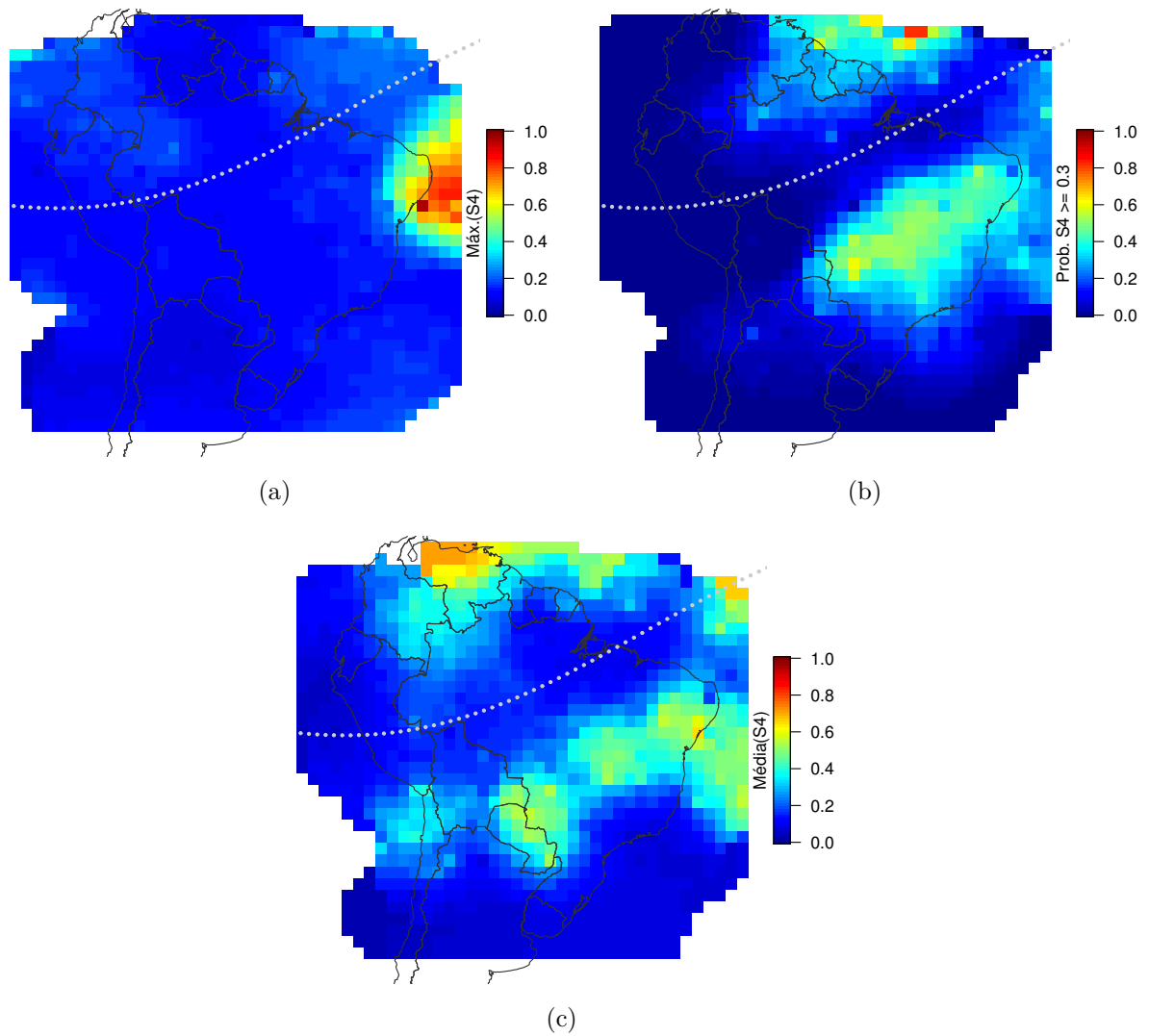


Figura 59 – Representação gráfica de exemplos de dados de treinamento (com saídas conhecidas) para a noite de 02/11/2014 considerando $t=19:30$ e $t_p=21:30$. (a) atributo de entrada e_1 ; (b) atributo de entrada e_2 ; (c) atributo de saída s_1 .

5.2.4 Resultados do modelo preditivo

Nesta seção, resultados de predição obtidos pelo modelo baseado em rede neural são apresentados. São exibidas comparações entre mapas de cintilação preditos (com diferentes janelas de predição) e mapas observados. Para os mapas preditos, o erro-médio-quadrático da rede neural calculado sobre o subconjunto de teste na etapa de validação ($REMQ(e)$ – Equação 5.18) é apresentado. Também são exibidos os indicadores de erro obtidos *a posteriori* (Eqs. 5.19 e 5.20), considerando o caso de pós-processamento de dados.

Um exemplo de aplicação do modelo é apresentado para a noite de 20 de Novembro de 2014, mostrando a possibilidade de utilização do modelo para geração de mapas preditos para toda noite às $t=19:30$ (UT-3). São exibidos mapas preditos para às 20:30, 21:30 e 22:30 (janelas de predição de uma a três horas, respectivamente). Os resultados são

mostrados na Figura 60, a qual permite uma comparação visual entre os mapas preditos e os mapas posteriormente observados. Pode-se notar que os mapas preditos figuram como uma representação suavizada da ocorrência de cintilação. Conforme a janela de predição aumenta, os resultados esperados tendem a ser mais generalistas, principalmente pela descorrelação do atributo e_1 com o aumento da janela de predição. Uma representação gráfica da rede neural treinada utilizada para a geração do mapa predito apresentado na Fig. 60a é apresentada na Figura 61. Trata-se de uma representação apresentada em Özesmi e Özesmi (1999), na qual os pesos positivos são representados por linhas pretas, e os negativos por linhas cinzas; a espessura das linhas indica a magnitude relativa dos pesos. Os valores numéricos destes pesos são apresentados no Quadro 5.2, e os valores iniciais são apresentados no Quadro 5.3.

Outro exemplo de aplicação do modelo é apresentado para o dia 30 de Novembro de 2014 considerando diferentes janelas de predição (de uma a quatro horas), simulando a incorporação de novos dados ao modelo no decorrer da noite. Os resultados são apresentados na Figura 62. Na Fig. 62a, é apresentado o resultado da predição para às 23:30 considerando quatro horas de antecedência ($t=19:30$). Na Fig. 62b, é apresentado o resultado da predição para o mesmo horário considerando três horas de antecedência ($t=20:30$); na Fig. 62c, para duas horas de antecedência ($t=21:30$); na Fig. 62d, para uma hora de antecedência ($t=22:30$); por fim, na Fig. 62e, o mapa observado é apresentado.

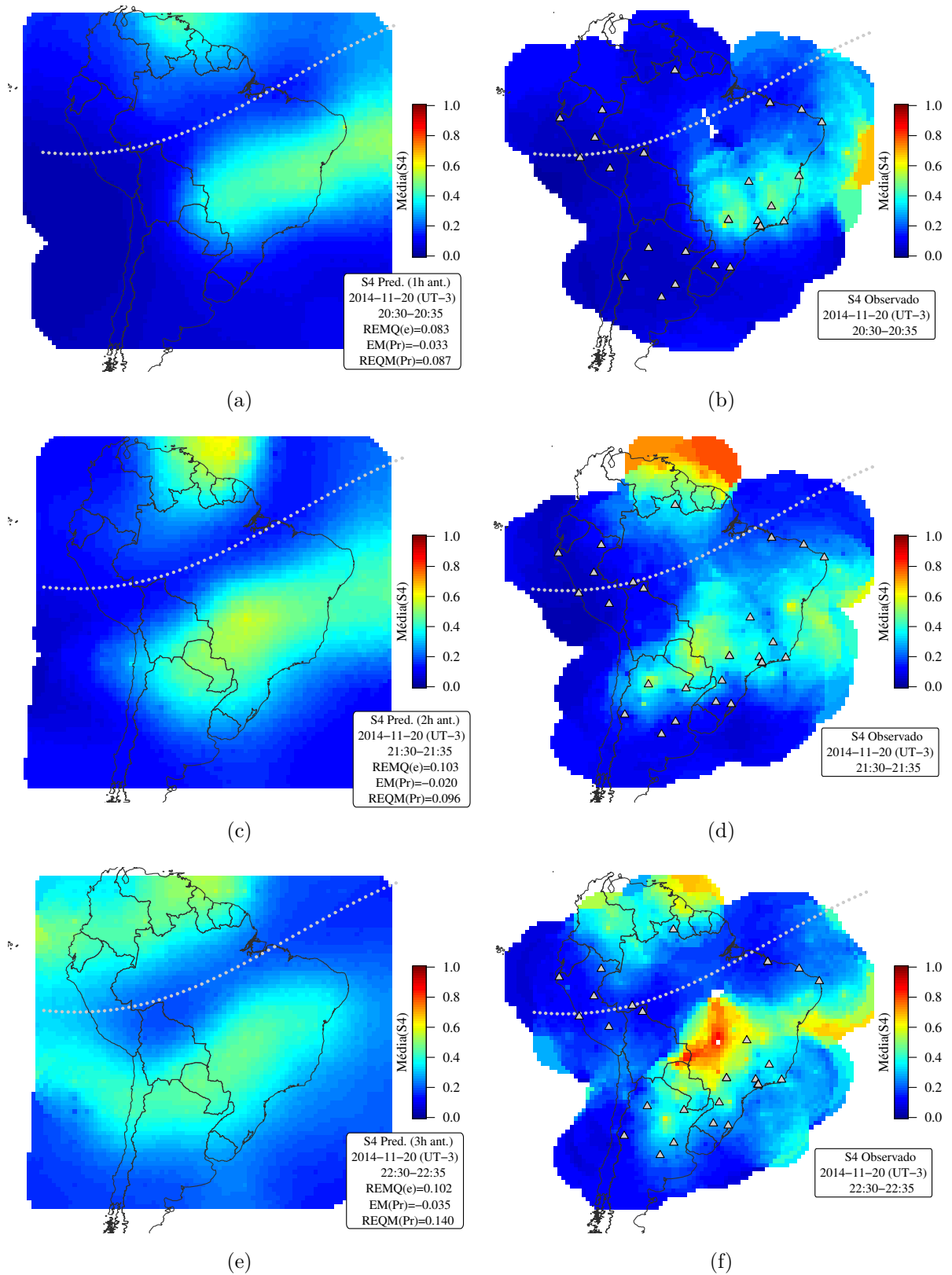


Figura 60 – Comparação entre mapas preditos (à esquerda) e observados (à direita): (a) Mapa predito para [20:30-20:35] com uma 1 hora de antecedência; (b) Mapa observado para [20:30-20:35]. (c) Mapa predito para [21:30-21:35] com 2 horas de antecedência; (d) Mapa observado para [21:30-21:35]; (e) Mapa predito para [22:30-22:35] com 3 horas de antecedência; (f) Mapa observado para [22:30-22:35].

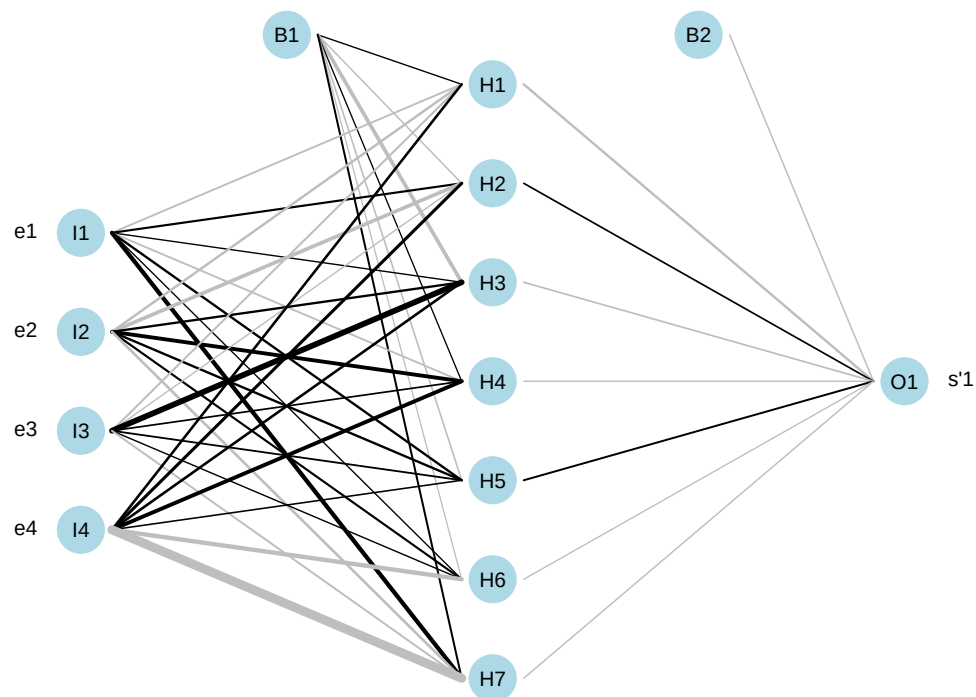


Figura 61 – Representação gráfica para a rede neural treinada baseada no método descrito em Özesmi e Özesmi (1999). Os pesos positivos são representados por linhas pretas, e os pesos negativos são representados por linhas cinzas. A espessura das linhas indica a magnitude relativa dos pesos.

Pesos p^o (entre camada de entrada e camada oculta)							
	NO_1	NO_2	NO_3	NO_4	NO_5	NO_6	NO_7
e_1	-2.308	3.081	0.456	-2.191	3.861	0.390	10.324
e_2	-4.198	-8.236	3.690	8.855	3.845	3.118	-4.883
e_3	-2.783	-0.561	15.308	1.614	1.985	0.570	-2.466
e_4	4.570	6.356	4.651	9.003	1.157	-10.580	-26.516
Vieses	0.446	-0.908	-8.468	0.319	-1.311	-0.176	2.578

Pesos p^s (entre camada oculta e camada de saída)								
	NO_1	NO_2	NO_3	NO_4	NO_5	NO_6	NO_7	Viés
NS^1	-4.107	1.577	-1.660	-0.497	2.479	-0.369	-0.818	-0.952

Quadro 5.2 – Pesos finais (após o treinamento).

Pesos p^o (entre camada de entrada e camada oculta)							
	NO_1	NO_2	NO_3	NO_4	NO_5	NO_6	NO_7
e_1	-1.455	1.777	0.887	0.005	1.206	-0.504	0.753
e_2	1.914	-0.782	-1.214	0.845	-1.377	1.111	1.166
e_3	1.491	-1.264	1.395	1.726	1.643	0.320	-0.949
e_4	0.359	1.151	0.733	-2.710	0.512	-1.642	0.064
Vieses	0.229	-0.779	-0.656	0.055	-0.854	-0.227	0.680

Pesos p^s (entre camada oculta e camada de saída)								
	NO_1	NO_2	NO_3	NO_4	NO_5	NO_6	NO_7	Viés
NS^1	-1.045	0.268	-0.532	-0.915	1.560	-0.171	0.047	-0.666

Quadro 5.3 – Pesos iniciais (definidos aleatoriamente).

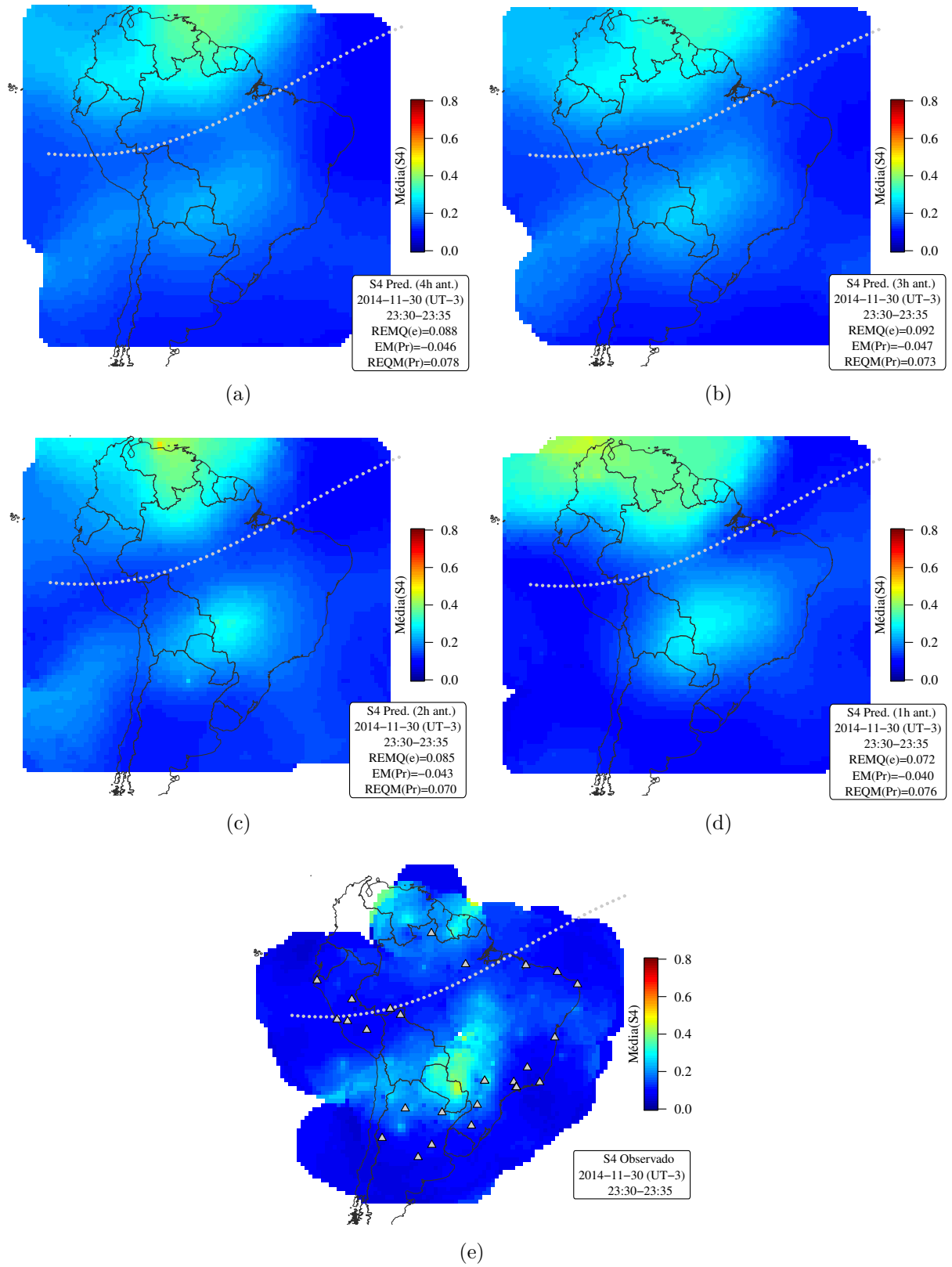


Figura 62 – Comparação de diferentes intervalos de predição: (a) Mapa predito para [23:30-23:35] com 4 horas de antecedência; (b) Mapa predito para [23:30-23:35] com 3 horas de antecedência; (c) Mapa predito para [23:30-23:35] com 2 horas de antecedência; (d) Mapa predito para [23:30-23:35] com 1 hora de antecedência; (e) Mapa observado para [23:30-23:35].

Visando avaliar os resultados em um período de tempo maior, o modelo foi utilizado para a geração de mapas preditos para o período que compreende a segunda quinzena do mês de Novembro/2014. Este período foi escolhido por compreender eventos de cintilação que ocorreram em todas as noites em diferentes níveis de severidade. A avaliação foi realizada considerando mapas preditos para $t_p=22:30$ (UT-3), realizadas com diferentes janelas de predição.

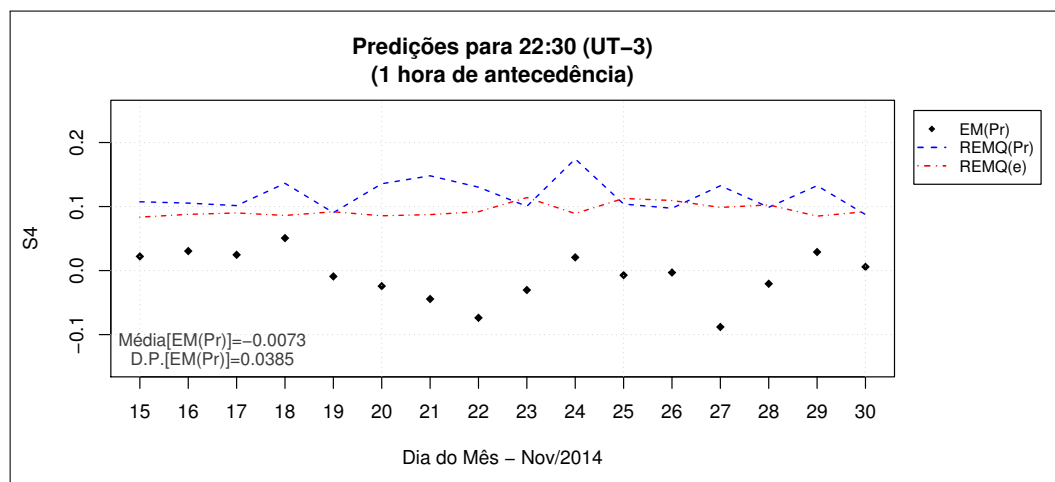
Na Figura 63, uma representação entre diferentes indicadores de erro é apresentada. A representação inclui o erro do modelo preditivo aplicado sobre o conjunto de testes ($REMQ(e)$ – Equação 5.18 – estimado *a priori* na época da predição), e os indicadores de erro médio ($EM(Pr)$ – Equação 5.19) e raiz do erro-médio-quadrático ($REMQ(Pr)$ – Equação 5.20) obtidos *a posteriori*, considerando o pós-processamento de dados.

Os valores de raiz do erro-médio-quadrático do modelo (estimados *a priori* e *a posteriori*) são representados como linhas tracejadas para cada predição, enquanto o valor do erro médio observado *a posteriori* é representado pelos pontos em preto. A média e o desvio-padrão do erro médio considerando todo o período são anotados na parte inferior dos gráficos.

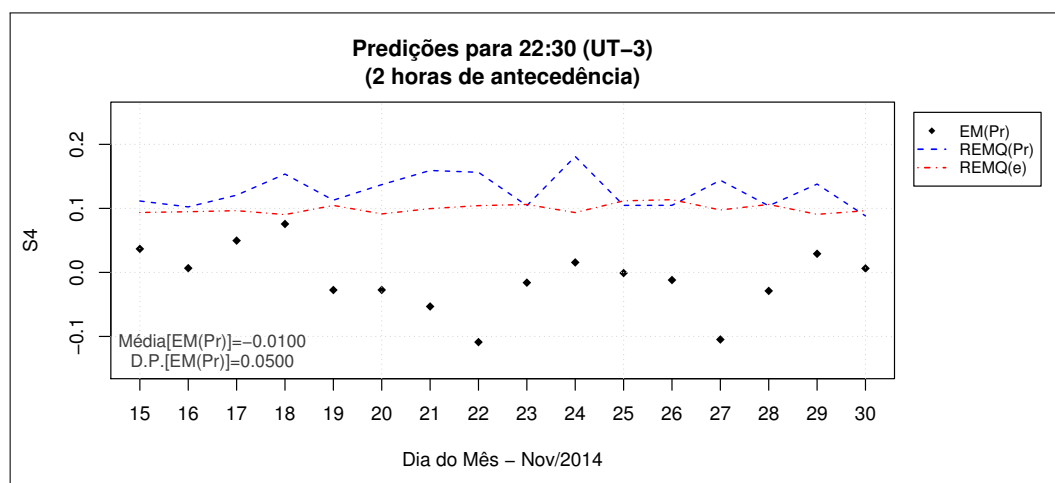
Os diferentes indicadores demonstram que os resultados são melhores conforme a janela de predição diminui. Para a janela de predição de uma hora (Fig. 63a), o valor absoluto do $EM(Pr)$ manteve-se inferior aos valores de $REMQ(e)$ obtidos no treinamento do modelo (com uma hora de antecedência). Com o aumento da janela de predição para duas horas, (Fig. 63b), o valor absoluto do $EM(Pr)$ se manteve mais próximo a $REMQ(e)$ (o qual foi definido com duas horas de antecedência). Por fim, com o aumento da janela de predição para três horas (Fig. 63c), houve um caso (27/11) em que o valor absoluto do $EM(Pr)$ foi superior a $REMQ(e)$ (definido com três horas de antecedência).

Observa-se também que, considerando todo o período, o modelo preditivo proporcionou erros médios próximos a 0, alternando entre valores ora positivos, ora negativos. Este aspecto sugere que o modelo não apresentou erros sistemáticos.

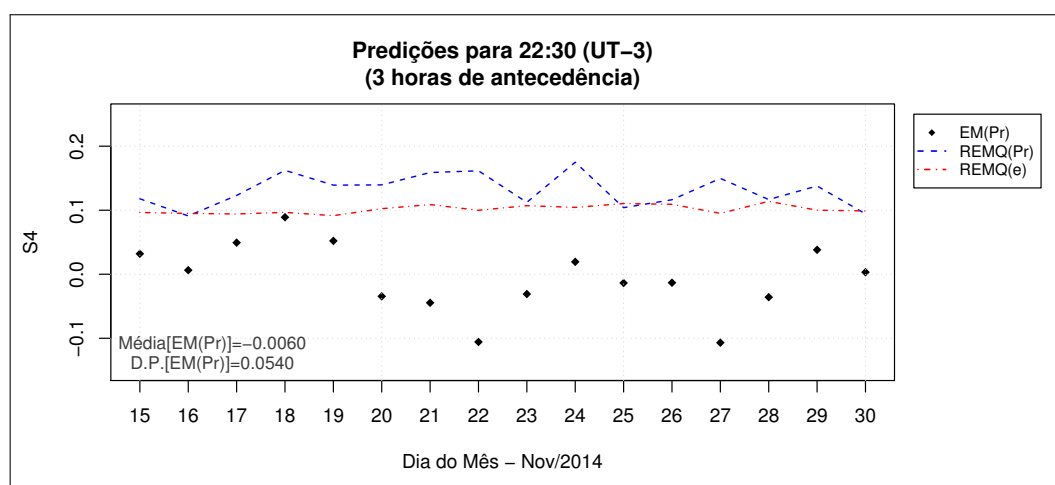
Observa-se também que os valores de $REMQ(Pr)$ obtidos *a posteriori* foram, na maioria dos casos, levemente superiores aos valores de $REMQ(e)$ obtidos na época do treinamento. Este aspecto permite inferir que a estimativa de erro aplicada sobre o conjunto de testes pode ser considerada otimista, aspecto que está relacionado com a variação da dinâmica da ionosfera nos diferentes conjuntos de dados envolvidos na aplicação do modelo (vide Figura 58).



(a)



(b)



(c)

Figura 63 – Comparação de indicadores de erro para diferentes intervalos de predição.

Algumas comparações entre mapas preditos e observados são apresentadas na sequência, visando evidenciar casos representativos no contexto da análise do valor do erro médio observado *a posteriori*.

Na Figura 64, a comparação entre um mapa predito (Fig. 64a) e mapa observado (Fig. 64b) para o dia 24/11/2014 é apresentada. Uma outra forma de avaliar os resultados da predição também é exibida na Fig. 64c. Trata-se de um mapa dos resíduos da predição, ou seja, a diferença entre os valores obtidos no mapa observado e no mapa predito. Com o mapa dos resíduos, é possível identificar os casos onde a predição foi subestimada (regiões em tons de azul) ou superestimada (regiões em tons de laranja). No exemplo apresentado, é possível identificar algumas regiões com resíduos relativamente altos (próximos a $|0,5|$ na escala do índice S4) – por exemplo, próximos à região da Colômbia e Equador. Este aspecto se deve às cintilações fortes afetando os valores de $S4_{IPP}$ na referida região no intervalo de observação do mapa – aspecto que não é capturado na respectiva predição.

Na Figura 65, são apresentados os resultados para o dia posterior, 25/11/2014, o qual apresentou valores de $EM(Pr)$ próximos a zero nas diferentes janelas de predição. Observa-se que os mapas preditos apresentaram aspectos similares entre si nas diferentes janelas de predição (de uma a três horas). Pela comparação visual, pode-se inferir que os resultados obtidos representam o cenário posteriormente observado com certa razoabilidade. Observa-se que as regiões mais a oeste nas quais foram registradas cintilações (conforme pode ser observado no mapa observado da Fig. 65a) não foram representadas pelas predições.

Na Figura 66, são apresentados os resultados para o dia 18/11/2014, o qual apresentou os maiores valores de $EM(Pr)$ positivos indicando que as predições foram subestimadas. De fato, pode-se notar – no mapa observado da Fig. 66a – que níveis severos de índice S4 foram observados e que os resultados do modelo preditivo foram subestimados. Observa-se também que a representatividade do mapa predito apresenta melhores resultados com a incorporação de novos dados (diminuição da janela de predição), principalmente pela contribuição do atributo e_1 que descreve a cintilação recente.

Na Figura 67, são apresentados os resultados para o dia 27/11/2014, o qual apresentou os menores valores de $EM(Pr)$ negativos indicando que as predições foram superestimadas. De fato, pode-se notar que no mapa observado (Fig. 67a) o valor do índice S4 é mais baixo que o esperado pelo modelo.

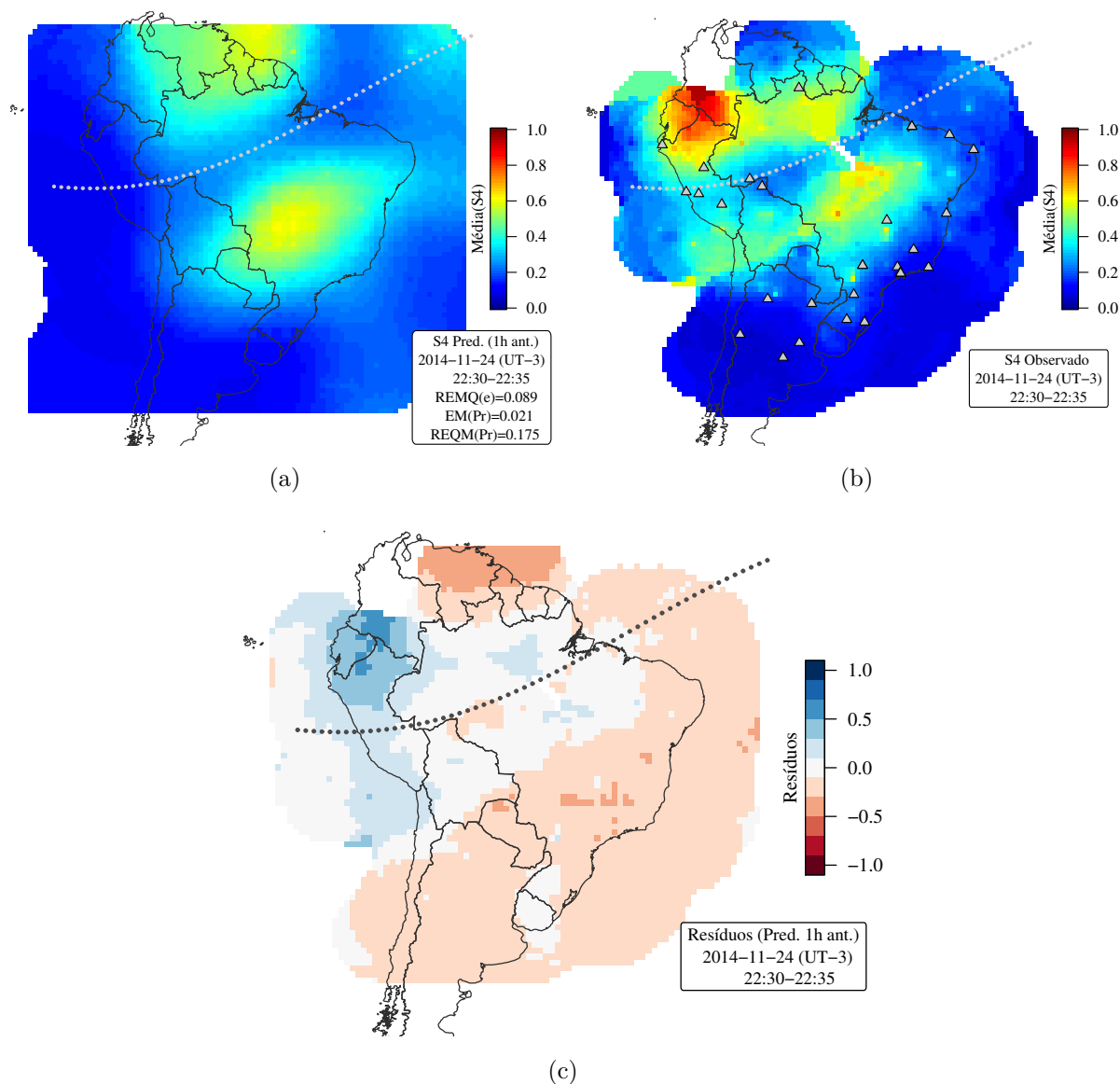


Figura 64 – Comparação entre mapa predito e mapa observado para às 22:30 do dia 24/11/2014, bem como mapa de resíduos: (a) Mapa predito para [23:30-23:35] com 1 hora de antecedência; (b) mapa observado para [22:30-22:35]; (c) mapa dos resíduos da predição.

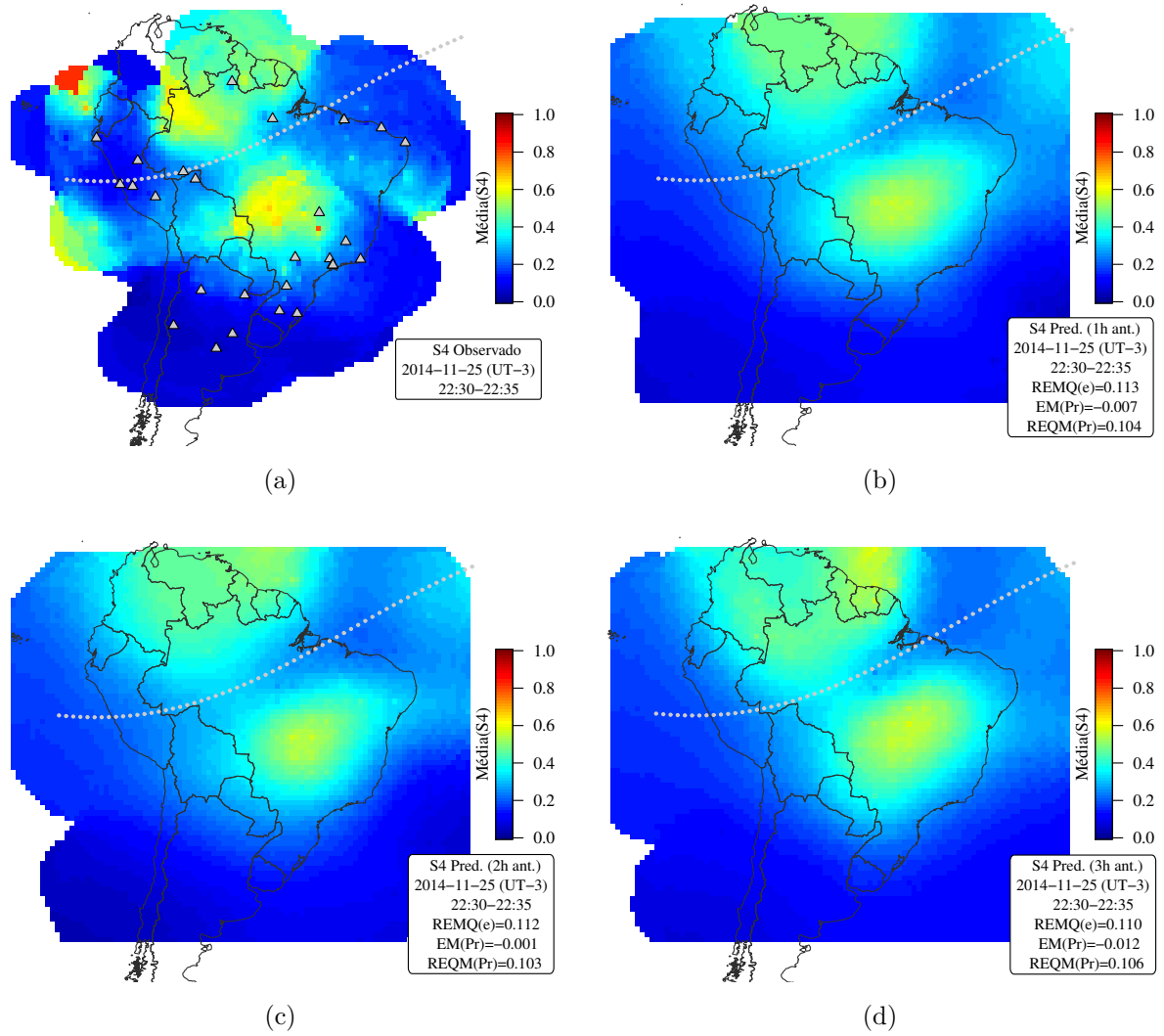


Figura 65 – Comparação entre mapa observado e mapas preditos para às 22:30 do dia 25/11/2014 com diferentes janelas de predição: (a) mapa observado; (b) predição com uma 1 hora de antecedência; (c) predição com 2 horas de antecedência; (d) predição com 3 horas de antecedência.

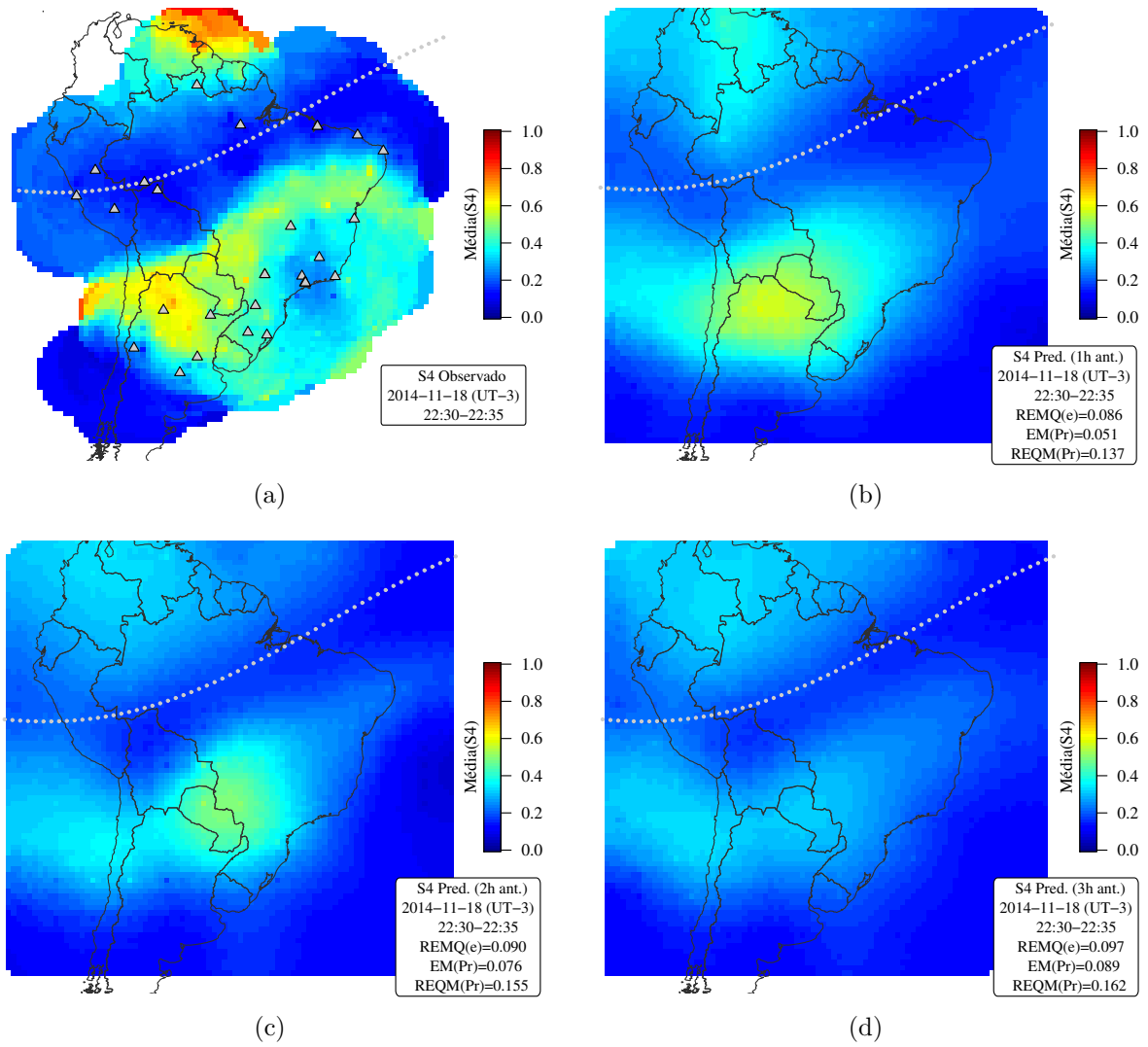


Figura 66 – Comparação entre mapa observado e mapas preditos para às 22:30 do dia 18/11/2014 com diferentes janelas de predição: (a) mapa observado; (b) predição com uma 1 hora de antecedência; (c) predição com 2 horas de antecedência; (d) predição com 3 horas de antecedência.

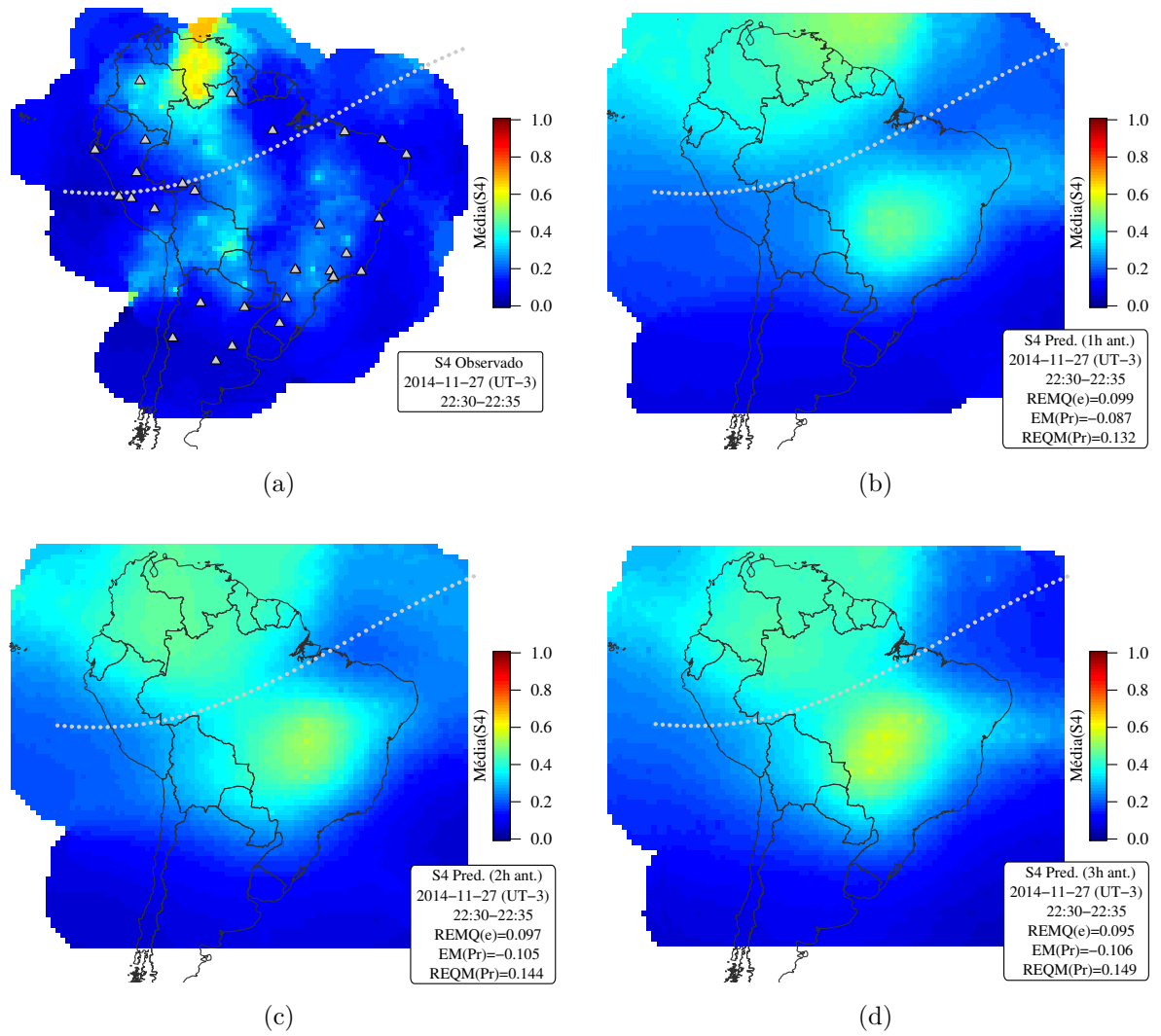


Figura 67 – Comparação entre mapa observado e mapas preditos para às 22:30 do dia 27/11/2014 com diferentes janelas de predição: (a) mapa observado; (b) predição com uma 1 hora de antecedência; (c) predição com 2 horas de antecedência; (d) predição com 3 horas de antecedência.

5.3 Discussão

Neste capítulo, foram apresentadas metodologias para a geração de mapas de S4 observado e predito. Adotou-se o índice S4 para a representação da cintilação principalmente pelo fato deste índice ser um padrão comercial (bem difundido junto às comunidades científica e de usuários de aplicações GNSS), além da alta disponibilidade de dados proporcionada pela integração de diferentes bases de dados (CIGALA/CALIBRA, ICEA e LISN). Outros tipos de mapas, como por exemplo, mapas de erros de rastreamento não foram considerados neste trabalho, uma vez que o desempenho de receptores na presença de cintilação está associado a configurações internas que podem variar de acordo com o fabricante ou opções definidas pelo usuário.

Os resultados obtidos permitem investigar o potencial de utilização de redes de monitoramento GNSS para o suporte de diferentes aplicações que poderiam ser beneficiadas pelo monitoramento da cintilação em tempo quase real. Tanto os mapas observados quanto os mapas preditos apresentam algumas configurações similares, como a agregação espacial e temporal.

Considerando o domínio espacial, as cintilações nos sinais GNSS são causadas por irregularidades de pequena escala na densidade do plasma ionosférico. Conforme discutido anteriormente, tipicamente a dimensão esperada destas irregularidades de pequena escala é inferior à escala de Fresnel $(\lambda h_i)^{0,5}$. Considerando as diferentes bandas que são utilizadas pelo GNSS, tem-se a dimensão aproximada de 300 m. Certamente, os mapas de cintilação propostos com resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ (latitude/longitude) não representam estas irregularidades de pequena escala. Contudo, eles proporcionam uma representação indireta e agregada das regiões em maior escala caracterizadas pela ocorrência de cintilação.

Considerando o domínio temporal, uma função de agregação foi aplicada para reduzir a numerosidade dos mapas de cintilação. O rearranjo permitiu uma redução de 80% no número de mapas (de minuto a minuto para cada cinco minutos). Como consequência, tem-se que os mapas representam uma caracterização da ionosfera no contexto de cintilação na região de cobertura para cada intervalo adotado de cinco minutos. As flutuações na intensidade do sinal podem ter duração na ordem de poucos milissegundos e apresentam alta variabilidade; por consequência, o índice S4 estimado a cada minuto também apresenta alta variabilidade, principalmente durante as cintilações mais fortes. Assim como em trabalhos anteriores destacados na seção 5.1, uma abordagem de suavização (ou agregação) também foi aplicada neste trabalho. Ao considerar um intervalo de tempo maior para a geração dos mapas e a média espaço-temporal, tem-se a possibilidade de representar as regiões nas quais se tem incidência de cintilação, ou seja, as regiões nas quais os sinais propagados terão maior suscetibilidade à ocorrência de cintilação. Além disso, a agregação espaço-temporal permitiu a integração de dados de diferentes receptores e a geração de um produto prático que tem potencial de utilização para usuários de aplicações GNSS.

Todas estas características e limitações dos mapas de cintilação devem ser levadas em consideração para quaisquer aplicações dos mesmos.

Para a geração de mapas preditos, um modelo baseado em rede neural artificial foi utilizado. O conceito de indicadores espaço-temporais foi aplicado na seleção de atributos de entrada e saída do modelo. Os resultados obtidos acompanham o comportamento das cintilações posteriormente observadas, conforme pôde ser verificado nas comparações entre os mapas preditos e observados, mas apresentam uma representação mais suavizada se comparados aos mapas observados. Em alguns casos, foi observado que os níveis de cintilação preditos foram superestimados ou subestimados, destacando que refinamentos do modelo devem ser objeto de investigações adicionais.

A acurácia dos mapas preditos pode ser avaliada considerando o pós-processamento dos dados (acurácia *a posteriori*), comparando-se os valores preditos com os valores posteriormente observados. Um indicador de qualidade do treinamento ($REMQ(e)$) pode ser estimado na época de predição e pode ser utilizado como uma aproximação para estimativa de qualidade da predição.

O aspecto de generalização do modelo causado pelo aumento das janelas de predição está associado com a dinâmica das irregularidades da ionosfera. Com o passar do tempo, a correlação espaço-temporal diminui, e principalmente o atributo que descreve a atividade recente (e_1) tende a perder sua efetividade. Este aspecto é melhorado com a incorporação de novos dados ao modelo preditivo ao longo da noite, em um esquema de filtragem e atualização das predições.

O modelo proposto segue uma abordagem orientada por dados (*data-driven*) e utiliza apenas dados GNSS. Este aspecto limita a antecedência das predições, principalmente devido aos casos em que a cintilação é esperada mas não ocorre (casos de inibição). Conforme destacado em (BAGIYA et al., 2014; SRIDHARAN et al., 2015), estes casos requerem um refinamento do modelo se a intenção é prever também possíveis eventos de ausências de cintilação quando ela era esperada. Neste caso, dados de outras fontes (como sondas digitais e indicadores de atividade solar) podem permitir uma melhor descrição destes casos. Este tipo de cenário não fez parte dos testes com o modelo preditivo apresentados neste tese.

A integração de bases de dados sob o gerenciamento de um SGBD torna o processo de análise exploratória dos dados mais eficiente, proporcionando suporte ao desenvolvimento de pesquisas adicionais. A recuperação de dados foi realizada utilizando-se a mesma infraestrutura do software ISMR Query Tool, evidenciando também o potencial de utilização de dados da base integrada para a realização de pesquisas adicionais.

5.4 Recomendações para Trabalhos Futuros

O modelo proposto segue uma abordagem orientada por dados. Modelos teóricos (ou climatológicos) e informações externas não foram incluídos na rede neural, estratégia que permitiu evidenciar o potencial de aplicação dos modelos orientados por dados, expondo também suas limitações e considerações para a realização de novas investigações. Investigações sobre a utilização de novas configurações baseadas em redes neurais podem ser realizadas, visando proporcionar melhorias no modelo preditivo.

Como foram utilizados apenas dados provenientes de receptores GNSS de monitoramento, recomenda-se a integração de bases de dados adicionais, incluindo o uso de dados de sondas digitais, dados de receptores GNSS convencionais e dados de outros sensores. Exemplificando, os dados de sondas digitais permitem uma descrição mais completa acerca da física da ionosfera associada à ocorrência (ou não ocorrência) das cintilações (SRIDHARAN et al., 2015). Os dados de receptores GNSS convencionais podem ser utilizados para estimativa de medidas indiretas de cintilação, como variações do TEC ou na razão sinal-ruído (PEREIRA; CAMARGO, 2017). Neste caso, redes de monitoramento adicionais (provenientes de outras redes, como a RBMC) poderiam ser utilizadas para melhorar a densidade de estações.

O algoritmo proposto tem flexibilidade de configurações e de parâmetros de entrada e de saída, podendo ser modificado e melhorado para novas aplicações na área de Geociências. Os atributos de entrada foram utilizados como variáveis preditoras espaço-temporais. Recomenda-se a realização de investigações acerca da utilização de novos preditores sob esta perspectiva para o desenvolvimento de novos modelos.

Foram utilizados parâmetros de resolução espacial adotados por questões de disponibilidade de dados, aspectos práticos e critérios empíricos. Recomenda-se a realização de investigações futuras para a adoção dos melhores candidatos a estes parâmetros – por exemplo, pode-se adotar uma resolução espacial variada conforme a densidade de dados de monitoramento. Para o caso das resoluções temporais (e de janelas de tempo), recomenda-se a realização de análise espectral dos índices de cintilação projetados no IPP para a definição destes termos.

Considerando a interpolação espacial, neste trabalho, devido ao modelo ser baseado em dados, optou-se pela interpolação baseada no inverso da distância (REZENDE et al., 2007). O uso de diferentes métodos de interpolação pode ser investigado. Neste caso, tem potencial uso o método de krigagem tendo como suporte um modelo teórico de cintilação adequado à região brasileira (de maneira similar ao proposto em Hamel et al. (2014)). Logo, com o desenvolvimento de um modelo teórico adequado à região brasileira (por exemplo, o BISM que está em desenvolvimento no INPE), pode-se integrá-lo ao modelo baseado em dados para proporcionar resultados adicionais.

Neste trabalho, os mapas de cintilação foram criados para a região de cobertura da rede de monitoramento (cobrindo, portanto, o território brasileiro praticamente em sua totalidade, de acordo com a disponibilidade de dados). Investigações adicionais podem ser realizadas na criação de modelos regionais. Com este aspecto, pode-se melhorar a resolução espacial dos atributos de entrada e saída para as regiões onde a densidade de estações de monitoramento é maior. Pode-se definir por exemplo, uma rede regional para cada região na qual a ionosfera apresenta comportamento distinto (por exemplo, uma rede neural para a região equatorial e outras redes para as regiões da anomalia equatorial).

Recomenda-se a realização de investigações para a representação de qualidade predita do modelo. Neste aspecto, dados históricos e informações complementares acerca da completude dos conjuntos de treinamento podem ser utilizados para relacionar os erros da predição aos parâmetros de entrada modelo, proporcionando a criação de mapas de erro predito com determinado grau de confiança – produto que pode auxiliar na interpretação das predições.

Os mapas propostos não foram designados para a reconstrução do nível de cintilação em cada *link* satélite-receptor. Recomenda-se a realização de investigações adicionais para verificar o potencial de aplicações dos mapas com este propósito. Neste caso, em complemento aos mapas, o desenvolvimento de uma função de mapeamento poderia ser objeto de investigação. Esta função poderia ter como parâmetros, além dos valores de S4 proporcionados pelo mapa, demais atributos com potencial de aplicação para qualquer região de cobertura da rede, tais como os ângulos de azimuth, elevação, γ e β .

Investigações adicionais também podem ser conduzidas no sentido de associar os mapas de cintilação ao conceito de integridade, o qual remete à uma medida de confiança que se pode obter acerca da exatidão das informações fornecidas pelo sistema de navegação e informar ao usuário quando o sistema de navegação não deve ser utilizado (BARBOSA et al., 2010). Dentro deste contexto, o conceito de *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM) também pode ser aplicado, o qual visa detectar erros e emitir alertas ao usuário em caso de integridade ameaçada (PRASAD; RUGGIERI, 2005).

Por fim, recomenda-se a efetiva disponibilização de produtos de saída de modelos preditivos – tais como os mapas de cintilação predita e demais visualizações interativas e relatórios acerca da atividade ionosférica em tempo quase real – à comunidade científica e de usuários de aplicações GNSS. A efetiva disponibilização permitiria aos usuários da tecnologia GNSS identificarem as características dos modelos, incluindo seus pontos fortes e/ou limitações. Este aspecto poderia motivar o desenvolvimento de novas pesquisas, produtos e serviços, trazendo avanços científicos e tecnológicos para suprir as demandas de diferentes aplicações que são afetadas pela ocorrência de cintilações.

6 Conclusões e Considerações Finais

Esta tese reuniu investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica na região brasileira no contexto do GNSS.

As investigações foram realizadas sob diferentes perspectivas, tais como a caracterização da climatologia das cintilações sob a perspectiva da rede de monitoramento CIGALA/CALIBRA, a qual é mantida atualmente pela FCT/UNESP com o apoio de parceiros (Capítulo 2); os efeitos da cintilação ionosférica nos circuitos internos de rastreamento do receptor (DLL/PLL) e os consequentes efeitos nas observáveis (Capítulo 3); a mitigação dos efeitos degradantes causados pela cintilação ionosférica no posicionamento GNSS, sobretudo no PPP (Capítulo 4); e o desenvolvimento de metodologias para geração de mapas de cintilação observados e preditos (Capítulo 5). As investigações foram suportadas pelos softwares científicos RT-PPP e ISMR Query Tool, ambos desenvolvidos na FCT/UNESP em pesquisas anteriores e disponíveis às comunidades científica e acadêmica pela internet. Recomendações para trabalhos futuros no contexto da mitigação e da predição foram apresentadas nas seções 4.5 e 5.4, respectivamente.

As investigações relacionadas à climatologia da ocorrência de cintilação reuniram os principais aspectos que descrevem o comportamento deste fenômeno na região brasileira. Dentre os assuntos abordados, foram apresentados aspectos relacionados ao monitoramento de cintilação por receptores GNSS (ISMRs) e os principais índices de cintilação.

Com o objetivo de caracterizar a cintilação no sinal GNSS sob a perspectiva dos principais índices de monitoramento utilizados (S4 e Sigma-phi), dados brutos coletados a 50 Hz foram processados. Foram apresentados exemplos acerca de desvanecimentos na intensidade do sinal (*fadings*) – os quais caracterizam as cintilações de amplitude – e as respectivas flutuações na fase do sinal caracterizando as cintilações de fase. Foi discutida a utilização de atributos adicionais (mais recentemente descritos na literatura) para descrever a ocorrência das cintilações, tais como os coeficientes de desvanecimento $\alpha - \mu$ e os ângulos γ e β que descrevem a propagação do sinal GNSS em possível alinhamento com as linhas de campo magnético terrestre.

No contexto da mitigação de cintilação ionosférica, os principais modelos de mitigação descritos na literatura foram objeto de investigação. Destaca-se que várias abordagens existentes foram desenvolvidas em pesquisas com participação de membros GEGE (e parceiros de outras instituições), destacando as contribuições da FCT/UNESP em frente aos desafios impostos pela cintilação no posicionamento GNSS na última década. As abordagens existentes foram avaliadas, sendo destacadas suas principais contribuições e limitações. A influência de cintilação forte no desempenho de um sinal GPS foi objeto

de investigação com suporte de dados de monitoramento das estações da rede CIGALA/CALIBRA. Foram apresentados diversos aspectos que incorrem sobre o sinal GNSS sob influência de cintilação, tais como degradações aparentes na acurácia das principais observáveis, perdas de ciclo, perdas de sincronismo, ambiguidades *half-cycle* e *canonical fading*. Estes aspectos foram identificados em dados de intensidade e fase coletados a 50 Hz e apresentados por meio de exemplos gráficos e numéricos – os quais podem proporcionar suporte ao desenvolvimento de melhorias em receptores GNSS sob cintilação forte.

Uma nova abordagem de mitigação foi proposta, a qual tem potencial para ser implantada em qualquer receptor GNSS. A abordagem proposta foi avaliada com dados GPS considerando o código modernizado L2C, explorando, portanto, o potencial de utilização de novos sinais GNSS no posicionamento. A eficácia da abordagem proposta foi avaliada através do processamento no modo PPP de conjuntos de dados de observação sob a influência de diferentes níveis de cintilação, incluindo cintilação forte. Pode-se considerar que os resultados obtidos foram promissores, mesmo em face a diversas limitações encontradas. As principais características da abordagem proposta foram discutidas, sendo destacadas inclusive suas limitações. Inúmeras sugestões para trabalhos futuros foram apresentadas com o objetivo de proporcionar melhorias ou superar as limitações da metodologia proposta.

Considerando a predição de cintilação ionosférica, as investigações foram direcionadas ao desenvolvimento de um modelo preditivo. Uma integração de base de dados foi realizada, sendo integrados dados de três redes de monitoramento (CIGALA/CALIBRA, ICEA e LISN). Os dados de monitoramento da base de dados integrada foram disponibilizados à comunidade científica por meio do software ISMR Query Tool, o qual está acessível atualmente pela internet. A efetiva disponibilização dos dados promove a difusão de conhecimento e provê suporte à realização de pesquisas adicionais em diversas instituições do Brasil e do mundo. Destaca-se que a base de dados integrada conta com mais de um trilhão de registros de monitoramento de cintilação (minuto a minuto) provenientes de mais de 90 estações de monitoramento.

Baseando-se em diversos aspectos descritos na literatura, tais como a utilização de dados de diferentes regiões, a consideração de variações do horário do pôr-do-sol em diferentes regiões e a utilização de descritores espaço-temporais, um modelo preditivo baseado em redes neurais artificiais foi desenvolvido. O modelo preditivo permite a estimativa de mapas de cintilação ionosférica preditos. Uma metodologia para o desenvolvimento de mapas de cintilação observados também foi apresentada, uma vez que estes podem ser utilizados como referência para descrever o comportamento da cintilação em determinado local e horário. As investigações tiveram como base os dados de monitoramento da base de dados integrada.

Por fim, ressalta-se que os objetivos da pesquisa foram alcançados – os quais reuniram investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica

aplicados à região brasileira no contexto do GNSS. Espera-se também que esta pesquisa tenha apresentado contribuições significativas no contexto de cintilação ionosférica na região brasileira, trazendo principalmente benefícios aos contextos tecnológico e científico nacionais, provendo suporte à implantação do sistema GBAS no Brasil e contribuindo para a realização de pesquisas adicionais.

Referências

- AGUIAR, C. R.; CAMARGO, P. O. Resolução espacial da grade ionosférica e do GIVE. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Universidade Federal do Paraná, v. 18, n. 3, 2012. Citado na página 33.
- AGUIAR, C. R.; KOZELINSKI, A. Mapas de TEC IONEX em tempo real gerados pelo modelo GIB (grade ionosférica brasileira). *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 8, 2015. Citado na página 33.
- ALFONSI, L.; SPOGLI, L.; FRANCESCHI, G. D.; ROMANO, V.; AQUINO, M.; DODSON, A.; MITCHELL, C. N. Bipolar climatology of GPS ionospheric scintillation at solar minimum. *Radio Science*, v. 46, n. 3, p. n/a–n/a, 2011. ISSN 1944-799X. doi:10.1029/2010RS004571. Citado 3 vezes, nas páginas 25, 120 e 126.
- ANDERSON, D. N.; REINISCH, B.; VALLADARE, C.; CHAU, J.; VELIZ, O. Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, Elsevier, v. 66, n. 17, p. 1567–1572, 2004. doi:10.1016/j.jastp.2004.07.010. Citado na página 51.
- AQUINO, M.; MONICO, J. F. G.; DODSON, A. H.; MARQUES, H.; FRANCESCHI, G. D.; ALFONSI, L.; ROMANO, V.; ANDREOTTI, M. Improving the GNSS positioning stochastic model in the presence of ionospheric scintillation. *Journal of Geodesy*, v. 83, n. 10, p. 953–966, Oct 2009. ISSN 1432-1394. doi:10.1007/s00190-009-0313-6. Citado 5 vezes, nas páginas 26, 79, 80, 89 e 92.
- ARANA, D. *Modelos geoidais híbridos para o Estado de São Paulo: desenvolvimento e avaliação*. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016. Citado na página 29.
- ARTERO, A. O. *Inteligência Artificial: Teoria e Prática*. [S.l.]: Livraria Física, 2009. Citado 4 vezes, nas páginas 135, 138, 140 e 141.
- BAGIYA, M. S.; SRIDHARAN, R.; SUNDA, S. Pre-assessment of the strength and latitudinal extent of L-band scintillation: A case study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 118, n. 1, p. 488–495, 2013. ISSN 2169-9402. doi:10.1029/2012JA017989. Citado na página 122.
- BAGIYA, M. S.; SRIDHARAN, R.; SUNDA, S.; JOSE, L.; PANT, T. K.; CHOUDHARY, R. Critical assessment of the forecasting capability of L-band scintillation over the magnetic equatorial region—campaign results. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 110, p. 15–22, 2014. doi:10.1016/j.jastp.2014.01.012. Citado 3 vezes, nas páginas 34, 122 e 163.
- 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, Curitiba, SciELO Brasil*, v. 16, n. 4, p. 589–605, 2010. Citado na página 165.
- BASU, S.; GROVES, K.; BASU, S.; SULTAN, P. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans. *Journal*

of atmospheric and solar-terrestrial physics, Elsevier, v. 64, n. 16, p. 1745–1754, 2002. doi:10.1016/S1364-6826(02)00124-4. Citado na página 117.

BASU, S.; MACKENZIE, E.; BASU, S. Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods. *Radio Science*, v. 23, n. 3, p. 363–378, 1988. ISSN 1944-799X. doi:10.1029/RS023i003p00363. Citado 2 vezes, nas páginas 47 e 52.

BEACH, T. L. *Global positioning System studies of equatorial scintillations*. Tese (Doutorado) — Cornell University, 1998. Citado na página 34.

BÉNIGUEL, Y.; ADAM, J.-P.; BOURDILLON, A.; LASSUDRIE-DUCHESNE, P. Ionosphere scintillation effects on navigation systems. *Comptes Rendus Physique*, Elsevier, v. 12, n. 2, p. 186–191, 2011. doi:https://doi.org/10.1016/j.crhy.2011.01.005. Citado na página 61.

BÉNIGUEL, Y.; HAMEL, P. A global ionosphere scintillation propagation model for equatorial regions. *Journal of Space Weather and Space Climate*, EDP Sciences, v. 1, n. 1, p. A04, 2011. doi:10.1051/swsc/2011004. Citado 4 vezes, nas páginas 14, 117, 118 e 119.

BLEWITT, G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, v. 17, n. 3, p. 199–202, 1990. ISSN 1944-8007. doi:10.1029/GL017i003p00199. Citado 2 vezes, nas páginas 81 e 94.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna mapping functions in vlbi analyses. *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 1, p. n/a–n/a, 2004. ISSN 1944-8007. doi:10.1029/2003GL018984. Citado 2 vezes, nas páginas 81 e 96.

BRASSAROTE, G. O. N.; SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. S4 index: Does it only measure ionospheric scintillation? *GPS Solutions*, Springer, v. 22, n. 1, p. 8, 2018. doi:10.1007/s10291-017-0666-x. Citado 2 vezes, nas páginas 28 e 41.

BRUNINI, C.; MEZA, A.; GENDE, M.; AZPILICUETA, F. South american regional ionospheric maps computed by GESA: A pilot service in the framework of SIRGAS. *Advances in Space Research*, v. 42, n. 4, p. 737 – 744, 2008. ISSN 0273-1177. doi:10.1016/j.asr.2007.08.041. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117708000987>. Citado na página 33.

CAMARGO, P. O. *Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência*. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999. Citado na página 33.

CESARONI, C.; SPOGLI, L.; ALFONSI, L.; FRANCESCHI, G. D.; CIRAIOLO, L.; MONICO, J. F. G.; SCOTTO, C.; ROMANO, V.; AQUINO, M.; BOUGARD, B. L-band scintillations and calibrated total electron content gradients over Brazil during the last solar maximum. *Journal of Space Weather and Space Climate*, EDP Sciences, v. 5, p. A36, 2015. doi:10.1051/swsc/2015038. Citado 2 vezes, nas páginas 120 e 121.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability. *RADIO SCIENCE*, v. 38, 2003. doi:10.1029/2000RS002604. Citado 7 vezes, nas páginas 25, 26, 33, 65, 66, 67 e 70.

- DATTA-BARUA, S.; DOHERTY, P.; DELAY, S.; DEHEL, T.; KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS positioning. In: *Proceedings of the ION GPS 2003*. Portland (OR): [s.n.], 2003. Citado 2 vezes, nas páginas 26 e 41.
- DAVIES, K. *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus, 1990. Citado na página 30.
- de PAULA, E. R.; KHERANI, E. A.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A.; KANTOR, I. J.; TAKAHASHI, H.; REZENDE, L. F. C.; MUELLA, M. T. A. H.; RODRIGUES, F. S.; KINTNER, P. M.; LEDVINA, B. M.; MITCHELL, C.; GROVES, K. M. Characteristics of the ionospheric F-region plasma irregularities over Brazilian longitudinal sector. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, Publications & Information Directorate, CSIR, v. 36, n. 4, p. 268, 2007. Citado 4 vezes, nas páginas 34, 35, 53 e 54.
- de PAULA, E. R.; RODRIGUES, F. S.; IYER, K. N.; KANTOR, I. J.; ABDU, M. A.; KINTNER, P. M.; LEDVINA, B. M.; KIL, H. Equatorial anomaly effects on GPS scintillations in Brazil. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 31, n. 3, p. 749–754, 2003. doi:10.1016/S0273-1177(03)00048-6. Citado 2 vezes, nas páginas 47 e 52.
- DIERENDONCK, A. J. V.; KLOBUCHAR, J. A.; HUA, Q. Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers. In: *Proceedings of the Institute of Navigation*. Alexandria (VA): [s.n.], 1993. v. 93, p. 1324–1333. Citado 4 vezes, nas páginas 26, 37, 41 e 42.
- ELMAS, Z. G. *Exploiting new GNSS signals to monitor, model and mitigate the ionospheric effects in GNSS*. Tese (Doutorado) — University of Nottingham, 2013. Citado na página 70.
- EUROPEAN COMISSION. *Ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users*. 2016. European GNSS (Galileo) Open Service. Citado na página 33.
- FERREIRA, A. A.; BORGES, R. A.; PAPARINI, C.; CIRAOLO, L.; RADICELLA, S. M. Short-term estimation of GNSS TEC using a neural network model in Brazil. *Advances in Space Research*, Elsevier, 2017. doi:10.1016/j.asr.2017.06.001. Citado 2 vezes, nas páginas 123 e 141.
- FONTANA, R. D.; CHEUNG, W.; NOVAK, P. M.; STANSELL, T. A. The new L2 civil signal. *GPS Joint Program Office*, 2001. Citado na página 63.
- FOROUZAN, B. A. *Comunicação de dados e redes de computadores*. [S.l.]: Bookman, 2006. Citado na página 46.
- FORTE, B. Analysis of the PLL phase error in presence of simulated ionospheric scintillation events. *Radio Science*, v. 47, n. 3, p. n/a–n/a, 2012. ISSN 1944-799X. doi:10.1029/2011RS004790. Citado 3 vezes, nas páginas 61, 90 e 95.
- FORTE, B.; RADICELLA, S. M. Problems in data treatment for ionospheric scintillation measurements. *Radio Science*, v. 37, n. 6, p. 8–1–8–5, 2002. ISSN 1944-799X. doi:10.1029/2001RS002508. Citado na página 90.
- FRITSCH, S.; GUENTHER, F. *neuralnet: Training of Neural Networks*. [S.l.], 2016. R package version 1.33. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=neuralnet>>. Citado 2 vezes, nas páginas 141 e 146.

- GAO, Y.; SHEN, X. A new method for carrier-phase-based precise point positioning. *Navigation*, Blackwell Publishing Ltd, v. 49, n. 2, p. 109–116, 2002. ISSN 2161-4296. doi:10.1002/j.2161-4296.2002.tb00260.x. Citado na página 82.
- GOAD, C. Surveying with the global positioning system. In: *Global Positioning System: Theory and Applications*. [S.l.]: Progress in Astronautics and Aeronautics, 1996. p. 501–517. doi:10.2514/5.9781600866395.0501.0517. Citado na página 77.
- GRALER, B.; PEBESMA, E.; HEUVELINK, G. Spatio-temporal interpolation using gstat. *The R Journal*, v. 8, p. 204–218, 2016. Disponível em: <<https://journal.r-project.org/archive/2016-1/na-pebesma-heuvelink.pdf>>. Citado na página 128.
- GURTNER, W.; ESTEY, L. RINEX - the receiver independent exchange format-version 3.00. *Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO*, PANGAEA, Boulder, Colorado, 2007. Citado na página 25.
- HAMEL, P.; SAMBOU, D. C.; DARCES, M.; BENIGUEL, Y.; HELIER, M. Kriging method to perform scintillation maps based on measurement and GISM model. *Radio Science*, v. 49, n. 9, p. 746–752, 2014. ISSN 1944-799X. doi:10.1002/2014RS005470. Citado 2 vezes, nas páginas 120 e 164.
- HAN, J.; KAMBER, M. *Data Mining: Concepts and techniques*. 2. ed. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann, 2006. 770 p. Citado na página 133.
- HAYKIN, S. *Neural Network: A comprehensive foundation*. [S.l.]: Pearson Education, 2004. v. 2. 41 p. Citado 3 vezes, nas páginas 138, 139 e 141.
- HEGARTY, C.; EL-ARINI, M. B.; KIM, T.; ERICSON, S. Scintillation modeling for GPS-Wide Area Augmentation System receivers. *Radio Science*, v. 36, n. 5, p. 1221–1231, 2001. doi:10.1029/1999RS002425. Citado 2 vezes, nas páginas 42 e 44.
- HOFFMAN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems*. Wien: Springer-Verlag, 2008. Citado 4 vezes, nas páginas 24, 43, 76 e 114.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *GPS: theory and practice*. Wien: New York: Springer-Verlag, 2001. v. 5. 382 p. Citado 2 vezes, nas páginas 10 e 31.
- HUMPHREYS, T. E.; PSIAKI, M. L.; KINTNER, P. M. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS carrier phase tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, v. 46, n. 4, p. 1624–1637, 2010. doi:10.1109/TAES.2010.5595583. Citado 2 vezes, nas páginas 68 e 116.
- HUMPHREYS, T. E.; PSIAKI, M. L.; LEDVINA, B. M.; CERRUTI, A. P.; KINTNER, P. M. Data-driven testbed for evaluating GPS carrier tracking loops in ionospheric scintillation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, IEEE, v. 46, n. 4, p. 1609–1623, 2010. doi:10.1109/TAES.2010.5595582. Citado na página 62.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Cintilação - EMBRACE - Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial*. 2014. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/sci-inicio/>>. Acesso em: 26 dez. 2017. Citado 2 vezes, nas páginas 14 e 120.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). *Annex 10, Volume I, Amendment 88 - Radio Navigation Aids*. [S.l.], 2013. Citado na página 26.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*: Recommendation ITU-R p.531-11. 1. ed. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.itu.int/pub/R-REC/en>>. Citado 2 vezes, nas páginas 42 e 50.

JEREZ, G. O. *Análise da integração GPS/GLONASS para posicionamento sobre efeito de cintilação ionosférica*. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017. Citado na página 29.

JIAO, Y.; XU, D.; MORTON, Y.; RINO, C. Equatorial scintillation amplitude fading characteristics across the GPS frequency bands. *Navigation*, v. 63, n. 3, p. 267–281, 2016. ISSN 2161-4296. doi:10.1002/navi.146. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/navi.146>>. Citado 2 vezes, nas páginas 44 e 47.

KIEFT, P.; AQUINO, M.; DODSON, A. Using ordinary kriging for the creation of scintillation maps. In: *Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project*. [S.l.]: InTech, 2014. doi:10.5772/58781. Citado na página 119.

KINTNER JR., P.; HUMPHREYS, T.; HINKS, J. GNSS and ionospheric scintillation: How to survive the next solar maximum. *Inside GNSS*, p. 22–30, 2009. Citado na página 52.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. *Introdução à geofísica espacial*. São Paulo: Nova Estella, Ed. USP/FAPESP, 1991. 149 p. Citado na página 48.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, AES-23, n. 3, p. 325–331, May 1987. Citado na página 33.

LAUNDAL, K. M.; RICHMOND, A. D. Magnetic coordinate systems. *Space Science Reviews*, Springer, v. 206, n. 1-4, p. 27–59, 2017. doi:10.1007/s11214-016-0275-y. Citado 2 vezes, nas páginas 34 e 56.

LIMA, C. M. D. A. *Posicionamento por ponto preciso com solução de ambiguidades inteiras no contexto de rede GPS*. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, 2015. Citado na página 28.

LIMA, G. R. T.; STEPHANY, S.; de PAULA, E. R.; BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Prediction of the level of ionospheric scintillation at equatorial latitudes in Brazil using a neutral network. *Space Weather*, v. 13, p. 446–457, 2015. doi:10.1002/2015SW001182. Citado na página 122.

LOGSDON, T. *The Navstar global positioning system*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1992. Citado na página 43.

MACHADO, W. C.; JUNIOR, E. S. F. Redes neurais artificiais aplicadas na previsão do VTEC no Brasil. *Boletim de Ciências Geodésicas*, SciELO Brasil, v. 19, n. 2, 2013. doi:10.1590/S1982-21702013000200005. Citado 2 vezes, nas páginas 123 e 147.

- MARQUES, H. A. *PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS*. 244 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012. Citado 6 vezes, nas páginas 24, 28, 29, 75, 76 e 79.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUKURO, M. H.; OYAMA, R. T.; WENTZ, J. P. PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análises de resultados no modo estático e cinemático. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 6, n. 66/6, 2014. Citado 6 vezes, nas páginas 24, 29, 75, 81, 94 e 96.
- MARQUES, H. A. S. *Modelo estocástico para dados GNSS e séries temporais de coordenadas GNSS*. 205 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, 2013. Citado 4 vezes, nas páginas 28, 70, 78 e 82.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. Cálculo do TEC usando dados de receptores GPS de dupla frequência para a produção de mapas da ionosfera para a região brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 1, n. 56, 2004. Citado na página 30.
- McNAMARA, L. F. *The Ionosphere: communications, surveillance, and direction finding*. Florida: Krieger, 1991. 237 p. Citado 2 vezes, nas páginas 25 e 48.
- MENDONÇA, M. A. M. *Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS*. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013. Citado na página 28.
- MENDONÇA, M. A. M.; MONICO, J. F. G.; MOTOKI, G. M. Efeitos da cintilação ionosférica na agricultura de precisão: Um estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 3., 2012, Presidente Prudente. *Anais...* Presidente Prudente: UNESP, 2012. v. 1, p. 262–267. Citado 2 vezes, nas páginas 26 e 28.
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. da UNESP, 2008. 476 p. Citado 9 vezes, nas páginas 24, 30, 32, 33, 65, 76, 77, 83 e 114.
- MORAES, A. O. *Análise do desempenho de um receptor GPS em canais com cintilação ionosférica*. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008. Citado na página 62.
- MORAES, A. O.; COSTA, E.; ABDU, M. A.; RODRIGUES, F. S.; de PAULA, E. R.; OLIVEIRA, K.; PERRELLA, W. J. The variability of low-latitude ionospheric amplitude and phase scintillation detected by a triple-frequency GPS receiver. *Radio Science*, v. 52, n. 4, p. 439–460, 2017. ISSN 1944-799X. doi: 10.1002/2016RS006165. Citado 10 vezes, nas páginas 28, 34, 35, 44, 47, 52, 55, 56, 57 e 58.
- MORAES, A. O.; COSTA, E.; de PAULA, E. R.; PERRELLA, W. J.; MONICO, J. F. G. Extended ionospheric amplitude scintillation model for GPS receivers. *Radio Science*, Wiley Online Library, v. 49, n. 5, p. 315–329, 2014. doi:10.1002/2013RS005307. Citado 3 vezes, nas páginas 69, 70 e 81.
- MORAES, A. O.; de PAULA, E. R.; PERRELLA, W. J.; RODRIGUES, F. S. On the distribution of GPS signal amplitudes during low-latitude ionospheric scintillation. *GPS solutions*, Springer, v. 17, n. 4, p. 499–510, 2013. doi: 10.1007/s10291-012-0295-3. Citado 3 vezes, nas páginas 67, 68 e 116.

- MORAES, A. O.; MUELLA, M. T. A. H.; de PAULA, E. R.; OLIVEIRA, C. B. A. de; TERRA, W. P.; PERRELLA, W. J.; MEIBACH-ROSA, P. R. P. Statistical evaluation of GLONASS amplitude scintillation over low latitudes in the brazilian territory. *Advances in Space Research*, v. 61, n. 7, p. 1776 – 1789, 2018. ISSN 0273-1177. doi:10.1016/j.asr.2017.09.032. Citado 2 vezes, nas páginas 28 e 47.
- MUELLA, M. T. A. H.; de PAULA, E. R.; MONTEIRO, A. A. Ionospheric scintillation and dynamics of Fresnel-scale irregularities in the inner region of the equatorial ionization anomaly. *Surveys in Geophysics*, Springer, v. 34, n. 2, p. 233–251, 2013. doi:10.1007/s10712-012-9212-0. Citado 2 vezes, nas páginas 25 e 47.
- MUELLA, M. T. A. H.; DUARTE-SILVA, M. H.; MORAES, A. O.; de PAULA, E. R.; REZENDE, L. F. C. de; ALFONSI, L.; AFFONSO, B. J. Climatology and modeling of ionospheric scintillations and irregularity zonal drifts at the equatorial anomaly crest region. In: COPERNICUS GMBH. *Annales Geophysicae*. [S.l.], 2017. v. 35, n. 6, p. 1201. doi:10.5194/angeo-35-1201-2017. Citado 5 vezes, nas páginas 11, 47, 48, 50 e 122.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). *Solar Cycle Prediction*. 2015. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>>. Acesso em: 10 set. 2015. Citado na página 48.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) - SPACE WEATHER PREDICTION CENTER. *Solar Cycle Progression*. 2018. Disponível em: <<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>>. Acesso em: 11 fev. 2018. Citado 2 vezes, nas páginas 10 e 49.
- NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN) - SPACE WEATHER. *Solar radio flux - Archive of measurements*. 2018. Disponível em: <<http://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-5-en.php>>. Acesso em: 11 mar. 2018. Citado 3 vezes, nas páginas 10, 48 e 49.
- NORTHWEST RESEARCH ASSOCIATES, INC. (NWRA). *The WBMod Ionospheric Scintillation Model*. 2011. Disponível em: <<http://spawx.nwra.com/ionoscint/wbmod.html>>. Acesso em: 15 jan. 2015. Citado 2 vezes, nas páginas 14 e 119.
- OHASHI, O.; TORGO, L. Wind speed forecasting using spatio-temporal indicators. In: *Proceedings of the 20th European Conference on Artificial Intelligence*. Montpellier, France: IOS Press, 2012. (ECAI '2012), p. 975–980. Citado 2 vezes, nas páginas 128 e 143.
- ÖZESMI, S. L.; ÖZESMI, U. An artificial neural network approach to spatial habitat modelling with interspecific interaction. *Ecological modelling*, Elsevier, v. 116, n. 1, p. 15–31, 1999. Citado 3 vezes, nas páginas 15, 151 e 153.
- PARK, J.; SREEJA, V.; AQUINO, M.; CESARONI, C.; SPOGLI, L.; DODSON, A.; FRANCESCHI, G. D. Performance of ionospheric maps in support of long baseline GNSS kinematic positioning at low latitudes. *Radio Science*, Wiley Online Library, v. 51, n. 5, p. 429–442, 2016. doi:10.1002/2015RS005933. Citado na página 28.
- PARK, J.; VEETIL, S. V.; AQUINO, M.; YANG, L.; CESARONI, C. Mitigation of ionospheric effects on GNSS positioning at low latitudes. *Navigation*, v. 64, n. 1, p. 67–74, 2017. ISSN 2161-4296. doi:10.1002/navi.177. Citado 5 vezes, nas páginas 28, 67, 80, 82 e 89.

- PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, v. 30, n. 7, p. 683 – 691, 2004. ISSN 0098-3004. doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300404000676>>. Citado na página 128.
- PENG, S.; MORTON, Y.; PELGRUM, W.; GRAAS, F. van. High latitude ionosphere scintillations at GPS L5 band. In: *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*. Portland, Oregon (USA): [s.n.], 2011. p. 597–607. Citado na página 44.
- PEREIRA, V. A. S. *Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS: em tempo real e pós-processado*. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015. Citado 2 vezes, nas páginas 28 e 54.
- PEREIRA, V. A. S.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. *GPS Solutions*, Springer, v. 21, n. 3, p. 1013–1025, 2017. doi:10.1007/s10291-016-0589-y. Citado 3 vezes, nas páginas 28, 47 e 164.
- PRASAD, R.; RUGGIERI, M. *Applied satellite navigation using GPS, GALILEO, and augmentation systems*. [S.l.]: Artech House, 2005. Citado 2 vezes, nas páginas 26 e 165.
- PROL, F. S. *Tomografia da ionosfera a partir do GNSS e técnicas algébricas: estudo de caso para a região brasileira*. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015. Citado 2 vezes, nas páginas 28 e 31.
- PROL, F. S.; CAMARGO, P. O.; MUELLA, M. T. A. H. Comparative study of methods for calculating ionospheric points and describing the GNSS signal path. *Boletim de Ciencias Geodésicas*, v. 23, p. 669 – 683, 12 2017. ISSN 1982-2170. doi:10.1590/s1982-21702017000400044. Citado na página 31.
- 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. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, scielo, v. 89, p. 1531 – 1542, 09 2017. ISSN 0001-3765. doi: 10.1590/0001-3765201720170116. Citado na página 31.
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2017. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Citado 2 vezes, nas páginas 68 e 146.
- REZENDE, L. F. C.; de PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; KINTNER, P. M. Mapping and survey of plasma bubbles over Brazilian territory. *Journal of Navigation*, Cambridge Univ Press, v. 60, n. 01, p. 69–81, 2007. doi:10.1017/S0373463307004006. Citado 5 vezes, nas páginas 25, 47, 119, 126 e 164.
- REZENDE, L. F. C.; de PAULA, E. R.; STEPHANY, S.; KANTOR, I. J.; MUELLA, M. T. A. H.; SIQUEIRA, P. M. de; CORREA, K. S. Survey and prediction of the ionospheric scintillation using data mining techniques. *Space Weather*, Wiley Online Library, v. 8, n. 6, 2010. doi:10.1029/2009SW000532. Citado na página 121.

- RICH, F.; BEAUJARDIÈRE, O. L.; RETTERER, J.; BASU, B.; GROVES, K.; JEONG, L.; BEACH, T.; HUNTON, D.; MELLEIN, J.; KACHNER, K. C/NOFS: a demonstration system to forecast equatorial ionospheric scintillation that adversely affects navigation, communication, and surveillance systems. In: *Proc. of SPIE Vol.* [S.l.: s.n.], 2004. v. 5548, p. 359. doi:10.1117/12.566115. Citado 3 vezes, nas páginas 10, 34 e 35.
- RIEDMILLER, M.; BRAUN, H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the rprop algorithm. In: *IEEE International Conference on Neural Networks*. San Francisco, CA: [s.n.], 1993. v. 1, p. 586–591. doi:10.1109/ICNN.1993.298623. Citado na página 141.
- ROCHA, R. S. M.; JEREZ, G. O.; BRASSAROTE, G. O. N.; MONICO, J. F. G. Avaliação do efeito da cintilação ionosférica e de diferentes intervalos de tempo de coleta de dados no posicionamento por ponto preciso na sua forma on-line. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 5, n. 2, p. 251–276, 2017. doi:10.3895/rbgeo.v5n2.5429. Citado na página 28.
- RODRIGUES, F. S. *Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando GPS*. 175 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Citado 2 vezes, nas páginas 34 e 35.
- RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; MCCLELLAND, J. L. et al. A general framework for parallel distributed processing. *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition*, v. 1, p. 45–76, 1986. Citado na página 138.
- SAMARASINGHE, S. *Neural networks for applied sciences and engineering: from fundamentals to complex pattern recognition*. [S.l.]: Auerbach, 2006. Citado 6 vezes, nas páginas 15, 133, 134, 135, 136 e 142.
- SCHAER, S.; GURTNER, W.; FELTENS, J. IONEX: The ionosphere map exchange format version 1. In: *Proceedings of the IGS AC workshop, Darmstadt, Germany*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 9, n. 11. Citado na página 33.
- SECAN, J.; BUSSEY, R.; FREMOUW, E.; BASU, S. An improved model of equatorial scintillation. *Radio Science*, Wiley Online Library, v. 30, n. 3, p. 607–617, 1995. doi:10.1029/94RS03172. Citado na página 117.
- SECAN, J.; BUSSEY, R.; FREMOUW, E.; BASU, S. High-latitude upgrade to the Wideband ionospheric scintillation model. *Radio Science*, Wiley Online Library, v. 32, n. 4, p. 1567–1574, 1997. doi:10.1029/97RS00453. Citado na página 117.
- SEEBER, G. *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p. Citado 7 vezes, nas páginas 10, 25, 30, 31, 32, 76 e 114.
- SEPTENTRIO SATELLITE NAVIGATION. *PolaRxS Application Manual: Version 2.5.0*. Leuven, Belgium, 2015. Citado 3 vezes, nas páginas 39, 41 e 45.
- SHUME, E. B.; MANNUCCI, A. J. First calculation of phase and coherence of longitudinally separated L-band equatorial ionospheric scintillation. *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 14, p. 3496–3501, 2013. ISSN 1944-8007. doi:10.1002/grl.50702. Citado 2 vezes, nas páginas 121 e 131.

- SHUME, E. B.; MANNUCCI, A. J.; BUTALA, M. D.; PI, X.; VALLADARES, C. E. Flux tube analysis of L-band ionospheric scintillation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 118, n. 6, p. 3791–3804, 2013. ISSN 2169-9402. doi:10.1002/jgra.50285. Citado 3 vezes, nas páginas 34, 35 e 122.
- SILVA, H. A.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; FRANCESCHI, G. D.; DODSON, A. Stochastic modelling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point positioning. *Advances in Space Research*, v. 45, n. 9, p. 1113 – 1121, 2010. ISSN 0273-1177. Special Issue: Recent Advances in Space Weather Monitoring, Modelling, and Forecasting. doi:10.1016/j.asr.2009.10.009. Citado 2 vezes, nas páginas 80 e 89.
- SILVA, H. R. *Desempenho do RTK em rede sob efeito de cintilação ionosférica*. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014. Citado na página 28.
- SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. *São Paulo: Artliber*, p. 33–111, 2010. Citado 4 vezes, nas páginas 134, 135, 138 e 141.
- SPOGLI, L.; ALFONSI, L.; FRANCESCHI, G. D.; ROMANO, V.; AQUINO, M. H. O.; DODSON, A. Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude european regions. In: EGU. *Annales Geophysicae*. [S.l.], 2009. doi:10.5194/angeo-27-3429-2009. Citado 2 vezes, nas páginas 120 e 126.
- SPOGLI, L.; ALFONSI, L.; ROMANO, V.; FRANCESCHI, G. D.; FRANCISCO, G. M. J.; SHIMABUKURO, M. H.; BOUGARD, B.; AQUINO, M. Assessing the GNSS scintillation climate over Brazil under increasing solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 105, p. 199–206, 2013. doi:10.1016/j.jastp.2013.10.003. Citado 2 vezes, nas páginas 47 e 121.
- SREEJA, V.; AQUINO, M.; ELMAS, Z. Impact of ionospheric scintillation on GNSS receiver tracking performance over Latin America: Introducing the concept of tracking jitter variance maps. *Space Weather*, Wiley Online Library, v. 9, n. 10, 2011. doi:10.1029/2011SW000707. Citado na página 119.
- SREEJA, V.; AQUINO, M.; ELMAS, Z. G.; FORTE, B. Correlation analysis between ionospheric scintillation levels and receiver tracking performance. *Space Weather*, v. 10, n. 6, p. n/a–n/a, 2012. ISSN 1542-7390. doi: 10.1029/2012SW000769. Citado na página 62.
- SRIDHARAN, R.; BAGIYA, M. S.; SUNDA, S. A novel method based on GPS TEC to forecast L band scintillations over the equatorial region through a case study. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 80, p. 230–238, 2012. doi:10.1016/j.jastp.2012.02.007. Citado na página 122.
- SRIDHARAN, R.; BAGIYA, M. S.; SUNDA, S.; CHOUDHARY, R.; PANT, T. K.; JOSE, L. First results on forecasting the spatial occurrence pattern of L-band scintillation and its temporal evolution. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 119, p. 53–62, 2014. doi:10.1016/j.jastp.2014.06.015. Citado na página 122.

- SRIDHARAN, R.; JOSE, L.; BAGIYA, M. S.; SUNDA, S.; CHAUDHARY, R.; PANT, T. K. Refinement of the background ionospheric conditions and plausible explanation based on neutral dynamics for the occurrence/non-occurrence of L-band scintillation patches against forecast. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 133, p. 18–24, 2015. doi:10.1016/j.jastp.2015.07.018. Citado 3 vezes, nas páginas 122, 163 e 164.
- STEENBURGH, R. A.; SMITHTRO, C. G.; GROVES, K. M. Ionospheric scintillation effects on single frequency GPS. *Space Weather*, v. 6, n. 4, p. n/a–n/a, 2008. ISSN 1542-7390. doi:10.1029/2007SW000340. Citado 2 vezes, nas páginas 34 e 35.
- STRANGEWAYS, H. J.; HO, Y.-H.; AQUINO, M. H. O.; ELMAS, Z. G.; MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; SILVA, H. A. On determining spectral parameters, tracking jitter, and GPS positioning improvement by scintillation mitigation. *Radio Science*, v. 46, n. 6, p. n/a–n/a, 2011. ISSN 1944-799X. doi: 10.1029/2010RS004575. Citado 2 vezes, nas páginas 45 e 66.
- THÉBAULT, E.; FINLAY, C. C.; BEGGAN, C. D.; ALKEN, P.; AUBERT, J.; BARROIS, O.; BERTRAND, F.; BONDAR, T.; BONESS, A.; BROCCO, L. et al. International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, Springer, v. 67, n. 1, p. 79, 2015. doi:10.1186/s40623-015-0228-9. Citado 2 vezes, nas páginas 56 e 145.
- TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGEWAYS, H. WBMod assisted PLL GPS software receiver for mitigating scintillation affect in high latitude region. In: *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI*. Istanbul, Turkey: [s.n.], 2011. p. 1–4. doi:10.1109/URSIGASS.2011.6050861. Citado 2 vezes, nas páginas 42 e 44.
- TIWARI, R.; STRANGEWAYS, H.; SKONE, S. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS carrier phase tracking using high rate TEC data. In: *26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, Tenn. [S.l.: s.n.], 2013. p. 2480–2488. Citado 2 vezes, nas páginas 26 e 116.
- TULUNAY, E.; SENALP, E. T.; RADICELLA, S. M.; TULUNAY, Y. Forecasting total electron content maps by neural network technique. *Radio Science*, v. 41, n. 4, p. n/a–n/a, 2006. ISSN 1944-799X. doi:10.1029/2005RS003285. Citado na página 123.
- VANI, B. C. *Análise da Cintilação Ionosférica no Brasil empregando GNSS e Técnicas de Mineração e Visualização de Dados*. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) — Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014. Citado 2 vezes, nas páginas 27 e 28.
- VANI, B. C.; IVÁNOVÁ, I.; MONICO, J. F. G.; SHIMABUKURO, M. H. Visualizing the quality of GNSS multivariate data. In: *Proceedings of the XV Brazilian Symposium on Geoinformatics (Geoinfo 2014)*. Campos do Jordão, Brasil: [s.n.], 2014. ISSN 2179-4820. Citado na página 28.
- 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*, Elsevier, v. 104, p. 125–134, 2017. doi:10.1016/j.cageo.2016.08.022. Citado 2 vezes, nas páginas 27 e 124.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth. New York: Springer, 2002. ISBN 0-387-95457-0. Citado na página 68.

WALTER, T. et al. Effect of ionospheric scintillations on GNSS: A white paper. *SBAS Ionospheric Working Group*, p. 22, November 2010. Citado 2 vezes, nas páginas 52 e 117.

WEISS, S. M.; INDURKHYA, N. *Predictive data mining: a practical guide*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1998. 228 p. Citado 3 vezes, nas páginas 21, 133 e 143.

WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM, KYOTO. *Geomagnetic Data Service*. 2015. Disponível em: <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>>. Acesso em: 23 jan. 2016. Citado 3 vezes, nas páginas 11, 53 e 55.

YACoub, M. D. *Foundations of mobile radio engineering*. [S.l.]: CRC press, 1993. Citado na página 40.

YACoub, M. D. The alpha-mu distribution: a general fading distribution. In: *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 629–633 vol.2. doi:10.1109/PIMRC.2002.1047298. Citado na página 68.

YACoub, M. D. The alpha-mu distribution: A physical fading model for the Stacy distribution. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 56, n. 1, p. 27–34, 2007. doi: 10.1109/TVT.2006.883753. Citado 2 vezes, nas páginas 67 e 68.

YAMASHITA, C. S. *Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude*. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. Citado na página 54.

ZHANG, X.; GUO, F.; ZHOU, P. Improved precise point positioning in the presence of ionospheric scintillation. *GPS solutions*, Springer, v. 18, n. 1, p. 51–60, 2014. doi:10.1007/s10291-012-0309-1. Citado 5 vezes, nas páginas 61, 65, 75, 94 e 114.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 102, n. B3, p. 5005–5017, 1997. ISSN 2156-2202. doi:10.1029/96JB03860. Citado 2 vezes, nas páginas 24 e 75.

Apêndices

APÊNDICE A – Algoritmo para cálculo dos ângulos γ e β

Algoritmo A.1 – Algoritmo para cálculo dos ângulos γ e β

```
# -Entrada:
# azim: azimuth do satellite (graus decimais)
# elev: elevacao do satellite (graus decimais)
# incl: inclinacao magnetica na regio do IPP (graus decimais)
# decl: declinacao magnetica na regio do IPP (graus decimais)
# -Saida:
# elev_incl_beta (graus decimais)
# azim_decl_gamma (graus decimais)
IrregularityAngle<- function(azim,elev,incl,decl) {
  if (azim>=90 & azim<=270){
    elev_incl_beta=180-(elev+abs(incl))
  } else{
    elev_incl_beta=elev-abs(incl)
  }
  azim=wrapTo180(azim);
  azim_decl_gamma=azim-decl;
  if (azim_decl_gamma>180){
    azim_decl_gamma=azim_decl_gamma-360;
  }
  if (abs(azim_decl_gamma)>90){
    if (azim_decl_gamma>90){
      azim_decl_gamma=180-azim_decl_gamma;
    } else {
      azim_decl_gamma=-180-azim_decl_gamma;
    }
  }
  return (data.frame(elev_incl_beta, azim_decl_gamma))
}
```