UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

MARIANA SANTOS SILVA

ANÁLISE ESTATÍSTICA ESPACIAL DOS EVENTOS DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO BRASIL

Dissertação de Mestrado

PRESIDENTE PRUDENTE
2021

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

MARIANA SANTOS SILVA

ANÁLISE ESTATÍSTICA ESPACIAL DOS EVENTOS DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO BRASIL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Julia de Mesquita Filho".

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico.

PRESIDENTE PRUDENTE
2021

S586a

Silva, Mariana Santos
Análise estatística espacial dos eventos de cintilação ionosférica no Brasil / Mariana Santos Silva. -- Presidente Prudente, 2021
122 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientador: João Francisco Galera Monico

1. Climatologia. 2. Cintilação ionosférica. 3. Sinais GNSS. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARIANA SANTOS SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA.

Aos 05 dias do mês de março do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARIANA SANTOS SILVA, intitulada **Análise estatística espacial dos eventos de cintilação ionosférica no Brasil**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciencias e Tecnologia de Presidente Prudente, Prof. Dr. BRUNO CÉSAR VANI (Participação Virtual) do(a) Presidente Epitácio / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Dr. ALISON DE OLIVEIRA MORAES (Participação Virtual) do(a) Centro Técnico Aeroespacial / Instituto de Aeronáutica e Espaço. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: **APROVADA**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO

DADOS CURRICULARES

Mariana Santos Silva

Nascimento	13/05/1994 - Presidente Prudente/SP
Filiação	Paulo Rogério de Oliveira Silva
	Lucilene dos Santos
2013 - 2018	Curso de Graduação
	Bacharelado em Engenharia Cartográfica
	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP, Campus de Presidente Prudente/SP
2018 - 2021	Curso de Pós-Graduação
	Mestrado em Ciências Cartográficas
	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP, Campus de Presidente Prudente/SP

DEDICATÓRIA

À minha mãe, que sempre se fez presente, me incentivou, orou por mim e me motivou durante todos os períodos da vida.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois sem Ele nada seria possível. É Ele que me sustenta, me aconselha, me acalenta em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais: Paulo e Lúcia que sempre se esteve comigo, me motivando e me auxiliando durante a vida. Meus irmãos, Roger, Rebeca e Davi, por todo cuidado, apoio, desabafos, vocês são essenciais na minha vida. Ao meu namorado, Roberto, por me ajudar tanto nas questões acadêmica como na vida, muito obrigada. Essa conquista também é de vocês!

Ao meu orientador Prof. Galera, por todas instigações, pelos ensinamentos, paciência, por acreditar na minha capacidade e por dividir comigo um pouco do seu conhecimento. Também gostaria de agrade ao Dr. Alison Moraes e ao Prof. Bruno Vani, por aceitarem o convite de participação da banca e por todas as considerações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), a Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo 465648/2014-2), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo 2017/50115-0) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – processo nº 88887.137186/2017-00), por proporcionar dados e ferramentas de qualidade para a realização dos estudos.

Aos professores do Departamento de Cartografia, por quem eu tenho muito carinho, obrigada por compartilhar conosco um pouco do conhecimento com tanta paixão e seriedade. Agradeço também aos funcionários do Departamento de Cartografia, por estarem sempre dispostos a nos atender.

Aos colegas do PPGCC, pela convivência diária e por todo apoio durante o desenvolvimento do projeto. Em especial, gostaria de agradecer ao Ítalo Tsuchiya pelo empenho na disponibilização do banco de dados e em me ajudar a solucionar todos os problemas computacionais no início dessa pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (88887.179771/2018-00).

RESUMO

A ionosfera é o principal fator que influencia na acurácia do posicionamento de usuários que possuem receptores de apenas uma frequência. Sabe-se que a ionosfera afeta o sinal GNSS de modo dispersivo e muito dinâmico, variando de acordo com a atividade solar, localização geográfica, horas do dia ou ainda de acordo com sazonalidade. Na região brasileira a ionosfera se comporta de modo distinto devido atuação de fenômenos físicos que influenciam a ionosfera. Entre os efeitos causados nos sinais GNSS pela ionosfera destaca-se a cintilação ionosférica. A cintilação ionosférica é um dos efeitos que mais se busca solução para mitigação, haja vista que afeta inúmeras atividades que envolvam posicionamento, como agricultura de precisão, navegação aérea dentre outros. Assim, devido sua importância e particularidade a cintilação ionosférica tem sido amplamente estudada e de relevância não só para o meio acadêmico, mas também para indústrias e outros seguimentos. Neste documento é apresentada uma revisão de literatura abordando os fenômenos físicos que propiciam a ocorrência de cintilação ionosférica. Também são apresentadas análises a respeito das variações na ocorrência de cintilação ionosférica. Para tais análises foram utilizadas técnicas baseadas na porcentagem de ocorrência de cintilação ionosférica, tanto em fase quanto em amplitude, dado um determinado limiar, bem como técnicas estatísticas. A partir dos dados da rede GNSS NavAer, abrangendo o período de março de 2011 a dezembro de 2018, obteve-se que para a cintilação ionosférica em amplitude os maiores picos ocorreram no ano de 2013/2014, entre as 22h e 4h UTC e nos meses de outubro a março, sendo novembro o mês com maior ocorrência. Já para a cintilação em fase, os maiores picos anuais foram também em 2013/2014 nos meses de outubro a março. Considerando as frequências, obteve-se que os sinais GNSS são mais afetados pela cintilação em amplitude na frequência L5 do que em L1 e L2, e na cintilação em fase temos o mesmo padrão: maior ocorrência em L5 e menor ocorrência em L1. Também se observou que a correlação entre a cintilação em amplitude e cintilação em fase pode chegar a 0,80 quando ocorrem em magnitudes altas.

Palavras-Chave: Climatologia, cintilação ionosférica, Sinais GNSS.

ABSTRACT

The ionosphere is the main factor that influences the accuracy of the positioning of users who have receivers of only one frequency. It is known that the ionosphere affects the GNSS signal in a dispersive and very dynamic way, varying according to solar activity, geographic location, hours of the day or even according to seasonality. In the Brazilian region, the ionosphere has a differently behavior due to the performance of physical phenomena that influence the ionosphere. Among the effects caused on the GNSS signals by the ionosphere, ionospheric scintillation stands out. It is one topic of great interest for investigation because it affects numerous activities that involve positioning, such as precision agriculture, air navigation, among others. Thus, due to its importance and particularity, ionospheric scintillation has been widely studied and of relevance not only for the academic environment, but also for agriculture industries, aviation companies and lot of other segments. This document presents a review addressing the physical phenomena that lead to the occurrence of ionospheric scintillation. Analyzes of variations in the occurrence of ionospheric scintillation are also presented. For such analyzes, techniques were used based on the percentage of occurrence of ionospheric scintillation, both in phase and in amplitude, given a certain threshold, as well as statistical techniques. From the data from the GNSS NavAer network, between March/2011 and December/2018 it was obtained that for the amplitude ionospheric scintillation the biggest peaks occurred in the year 2013 and2014, between 22h and 4h UTC and in the months of October to March, being November the month with the highest occurrence. As for the phase scintillation, the biggest annual peaks were also in 2013 and 2014 in the months of October to March. Considering the frequencies, it was found that the scintillation performs differently on GNSS signals and the L5 frequency is more affected by amplitude and phase scintillation than in L1 and L2. It was also observed that the amplitude scintillation and phase scintillation are strong correlated and this correlation can reach 0,80 when this occurrence has higher values.

Keywords: Climatology, ionospheric scintillation and GNSS signals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estações das redes de monitoramento contínuo – GNSS NavAer..... 12
Figura 2 - Fase da onda portadora 19
Figura 3 - Simples e duplas diferença 23
Figura 4 - Esquema de possíveis divisões da atmosfera terrestre..... 25
Figura 5 - Processo de ionização 26
Figura 6 - Anomalia Magnética do Atlântico Sul..... 30
Figura 7 - Anomalia de Ionização Equatorial..... 32
Figura 8 - Bolhas de plasma causada pela evolução de uma instabilidade ionosférica.. 35
Figura 9 - Deslocamento das bolhas ionosféricas 35
Figura 10 - Sinais com a mesma frequência e potências diferentes 42
Figura 11 - Intensidade do sinal sob influência da cintilação..... 43
Figura 12 - Exemplo de dois sinais de mesma frequência e a medida de fase entre eles44
Figura 13 - Estações CIGALA/CALIBRA utilizadas 47
Figura 14 - Identificação de outliers utilizando a técnica GBSC - Estação SJCU 50
Figura 15 - Identificação de outliers utilizando a técnica GBSC - Estação MAC3 50
Figura 16 - Identificação de outliers utilizando a ferramenta ISMR Query Tools- Estação SJCU..... 51
Figura 17- Identificação de outliers utilizando a ferramenta ISMR Query Tools- Estação MAC3..... 52
Figura 18 - Estações selecionadas para apresentação dos resultados..... 53
Figura 19 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação diurna..... 54
Figura 20 - CCDF - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 variação diurna..... 57
Figura 21 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação diurna..... 60
Figura 22 - CCDF - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação diurna..... 63
Figura 23 - CCDF - Comparação de S_4 entre as frequências L1, L2 e L5 no período entre as 21h e as 4h..... 66
Figura 24 - CCDF - Comparação de σ_φ entre as frequências L1, L2 e L5 no período entre as 21h e as 4h..... 69

Figura 25 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com os meses 73
Figura 26 - CCDF - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 variação de acordo com os meses 76
Figura 27 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com os meses 79
Figura 28 - CCDF - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com os meses 82
Figura 29 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com o ciclo solar 85
Figura 31 - Média anual do fluxo solar - Índice F10.7 87
Figura 32 - CCDF - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 variação de acordo com o ciclo solar 89
Figura 33 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com o ciclo solar 92
Figura 34 - CCDF - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com o ciclo solar 95
Figura 35 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com a latitude 98
Figura 36 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com a latitude 99
Figura 37 - Correlação entre S_4 e σ_φ - 2011 a 2018 100
Figura 38 - Correlação entre S_4 e σ_φ - Junho/2018 e Março/2014 101
Figura 39 - Correlação entre S_4 e σ_φ - restringindo de acordo com as janelas de maior ocorrência de cintilação ionosférica - outubro a março dos anos 2013 e 2014, entre as 21h e as 4h 103
Figura 40 - Correlação entre S_4 e σ_φ - restringindo de acordo com as janelas de maior ocorrência de cintilação ionosférica - nov/2014, entre as 21h e as 4h 104
Figura 41 - Discrepâncias das coordenadas - PRU2 - Dia 02/03/2014 entre as 00:30 e as 01:00 - UTC 105
Figura 42 - Número de satélites utilizados no posicionamento - PRU2 - Dia 02/03/2014 entre as 00:30 e as 01:00 - UTC 106
Figura 43 - Quantidade de satélites com S_4 maior que 0,8 - PRU2 - Dia 02/03/2014 entre às 00:30 e as 01:00 - UTC 106

Figura 44 - Quantidade de satélites com S_4 maior que 0,8 UFBA - Dia 02/03/2014 entre as 21:00 e as 23:59 - UTC 107
Figura 45 - Posicionamento por ponto - UFBA - Dia 02/03/2014 entre as 22:00 e as 23:59 108
Figura 46 - Número de satélites utilizados no posicionamento - UFBA - Dia 02/03/2014 entre as 22:00 e as 23:59 - UTC 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes e erros sistemáticos 20
Tabela 2 - Relação índice Kp com variação R 33
Tabela 3 - Máximo erro vertical devido à ionosfera 41
Tabela 4 - Coordenadas das estações 46
Tabela 5 - Data de início e data final de coleta de cada estação durante o período estudado 47
Tabela 6- Porcentagem de dados disponíveis para cada estação, considerando como total o período de março/2011 a dezembro/2018 48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

1.1. Considerações iniciais 11

1.2. Objetivos 13

1.3. Justificativa 14

1.4. Conteúdo do trabalho 15

2. POSICIONAMENTO GNSS 16

2.1. Sistemas de posicionamento GNSS 16

2.2. Observáveis GNSS 17

2.2.1. Pseudodistância 18

2.2.2. Fase da onda portadora 18

2.2.3. Erros nas observáveis 19

2.3. Métodos de posicionamento GNSS 21

2.3.1. Posicionamento por ponto simples e preciso 21

2.3.2. Posicionamento relativo 22

3. IONOSFERA 25

3.1. Características Gerais 26

3.2. TEC - (*Total Electron Content*) e suas variações 28

3.2.1. Anomalia Magnética do Atlântico Sul 30

3.2.2. Anomalia Equatorial 31

3.2.3. Distúrbios magnéticos 32

3.3. Irregularidades e bolhas ionosféricas 33

4. EFEITO IONOSFÉRICO NOS SINAIS GNSS 37

4.1. Refração ionosférica 37

4.2. Cintilação ionosférica 41

4.2.1. Cintilação de amplitude 42

4.2.2. Cintilação em fase 43

5. METODOLOGIA 46

5.1. Dados 46

5.2. Métodos 49

5.2.1. GBSC- *Ground-Based Scintilation Climatology* 49

5.2.2. CCDF - *Complementary Curve Distribution Function* 49

5.3. Análises preliminares 49

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 53

6.1. Variação diurna 53

6.2. Variação sazonal 72

6.3. Variação de acordo com o ciclo solar 84

6.4. Variação de acordo com a latitude 97

6.5. Correlação entre S_4 e σ_φ 99

6.6. Estudo de caso: A influência do S_4 no posicionamento 105

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 110

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

1. INTRODUÇÃO

Neste tópico serão apresentadas as considerações iniciais, os objetivos bem como a justificativa desta pesquisa.

1.1. Considerações iniciais

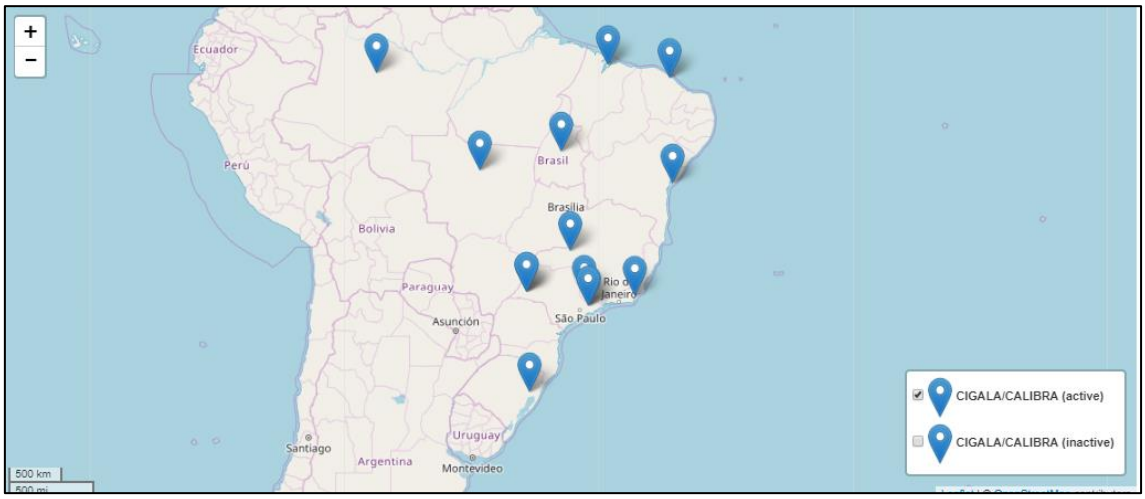
Com o avanço da tecnologia, o usuário tem se tornado mais exigente quanto aos produtos gerados a partir de dados de satélites, necessitando assim de produtos cada vez mais acurados. O principal fator que afeta a acurácia do posicionamento GNSS para usuários de uma única frequência é a ionosfera. A ionosfera é considerada a camada da atmosfera que está compreendida entre, aproximadamente, 50 km e 1.000 km (CAMARGO, 1999).

Um parâmetro que traz informações sobre a ionosfera é o TEC (*Total Electron Content*) que consiste na quantidade total de elétrons ao longo do caminho entre o satélite e o receptor. Para usuários que dispõem de receptores de duas ou mais frequências, o TEC pode ser calculado e/ou eliminado a partir delas. No entanto, quando o usuário dispõe de receptores de apenas uma frequência, algum modelo deve ser utilizado. No entanto, tal modelagem não é tão trivial, pois o TEC varia no espaço e no tempo, sofre influência do fluxo de ionização solar, atividade geomagnética, ciclo de manchas solares, ângulo zenital do Sol, estações do ano, hora local, direção do raio vetor do satélite e localização geográfica (CAMARGO, 1999; LEICK 1995).

As irregularidades ionosféricas se dão devido as perturbações na densidade do plasma ionosférico, que se originam por meio de processos de instabilidade de plasma tipo Rayleigh-Taylor (R-T). Quando o sinal GNSS se propaga por uma região ionosférica na qual a variação da densidade eletrônica não é regular, ocorre a cintilação ionosférica. De acordo com Rodrigues (2004), a cintilação ionosférica pode ser definida como flutuações da amplitude ou da fase de uma onda de rádio. Os efeitos da cintilação são mais preocupantes nas regiões aurorais e tropicais durante as noites, próximos aos equinócios de primavera e outono, e a ocorrência da cintilação aumenta durante os períodos de alta atividade solar ou tempestades geomagnéticas (SILVA, 2010). Na região brasileira, as cintilações possuem maior ocorrência de setembro a março, após o pôr do Sol até a meia noite local. Tal ocorrência acaba afetando algumas atividades, dentre elas as que se utilizam do posicionamento por GNSS em tempo real, como por exemplo a agricultura de precisão e a navegação aérea.

Com a finalidade de estudar, modelar e mitigar os erros advindos da ionosfera e analisar seus efeitos no posicionamento GNSS na região brasileira, os projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to ionospheric disturbances in BRAzil*) juntamente com o projeto FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) denominado GNSS-SP foram instituídos. Com isto foi estabelecida a rede CIGALA-CALIBRA para monitoramento da cintilação ionosférica no Brasil. Os dados têm sido coletados desde fevereiro de 2011, quando as duas primeiras estações foram instaladas em Presidente Prudente-SP (PRU1 e PRU2). Atualmente a rede conta com 13 estações disponíveis envolvendo os três projetos (*Figura 1*), a qual passará a denominar Rede INCT GNSS NavAer, haja vista que praticamente todos os receptores originais foram substituídos por outros adquiridos neste novo projeto.

Figura 1- Estações das redes de monitoramento contínuo – GNSS NavAer



Fonte: ISMR Query Tools (2019)

Os receptores utilizados na rede são do modelo PolaRxS, desenvolvidos pela Septentrio e são capazes de coletar simultaneamente GPS L1CA, L1P, L2C, L2P, L5; GLONASS L1CA, L2CA; Galileo E1, E5a, E5b, E5AltBoc; COMPASS B1, B2; SBAS L1 (Bougard, 2011). Os receptores da rede atuam na frequência de 50Hz e fornecem os seguintes dados:

- índice $\sigma_{\varphi,}$ referente a cintilação de fase (1,3,10,30,60 segundos);
- índice S_4, referente a cintilação de amplitude (60 segundos);
- conteúdo total eletrônico (TEC) e *Rate* TEC;
- parâmetros espectrais;
- desvio padrão do código (CCSTDDEV – 60 segundos);

- média da portadora proporcional ao ruído (60 segundos);
- *locktime* (60 segundos)

Assim, uma grande quantidade de dados é coletada e disponibilizada para os usuários que desejam caracterizar, e no futuro auxiliar na minimização dos efeitos resultantes da cintilação ionosférica. Para explorar os dados da rede, foi desenvolvida a ferramenta chamada ISMR (*Ionosphere Scintillation Monitoring Receiver) Query Tool*, onde são fornecidos importantes resultados para buscas que beneficiam o usuário interessado em cintilação ionosférica (VANI, SHIMABUKURO E MONICO, 2017).

A partir de dados de redes de monitoramento da ionosfera muitas pesquisas têm sido realizadas no sentido de caracterizar a cintilação ionosférica. Li (2010) desenvolveu um estudo estatístico da ocorrência da cintilação em sinais GPS nos anos 2007-2008 utilizando de receptores GISTM (*GPS Ionospheric Scintillation/TEC Monitor*) em estações localizadas na região polar. Em 2011, Alfonsi et. al aplicou a técnica GBSC (*Ground Based Scintillation Climatology*) para analisar a ocorrência da cintilação ionosférica na Noruega e na Antartida. Spogli et. al (2013) realizou um experimento para a região brasileira utilizando de dados da rede CIGALA/CALIBRA no período de agosto a novembro 2011. Mais recentemente, Sahithi et. al (2018) realizaram um estudo para a região de baixa latitude no sul da Índia durante o ano de 2013. Além da análise estatística, outra ferramenta que tem sido usada para o estudo, classificação e previsão da ocorrência de cintilação ionosférica é o aprendizado de máquina (*Machine Learning*), como trazem Piersant et. al (2017), Jiao, Hall e Morton (2017), MacGranghan (2018), Linty et. al (2019).

Portanto, considerando a importância da cintilação ionosférica para o posicionamento por satélite, e a grande disponibilidade de dados advindos dos projetos citados, neste projeto de pesquisa será realizado uma análise estatística da ocorrência de cintilação ionosférica via os parâmetros que a descrevem, tais como o S_4 e o σ_ϕ, bem como sua associação com os efeitos no posicionamento e navegação.

1.2. Objetivos

O objetivo principal dessa dissertação de mestrado é realizar uma análise estatística espacial da ocorrência da cintilação ionosférica no Brasil. Os objetivos secundários consistem em:

- Analisar a ocorrência da cintilação ionosférica em amplitude, considerando a classificação utilizada por Muella et.al (2009);
- Analisar a ocorrência da cintilação ionosférica em fase, considerando a classificação utilizada por Hegarty et.al (2001).
- Aplicar estes limiares para realizar uma análise da cintilação ionosférica considerando:
    - Ciclo solar;
    - Variação sazonal;
    - Latitude; e
    - Hora local.
- Identificar os limiares de S_4 que influenciam no posicionamento por ponto simples, bem como a quantidade de satélites afetado por este limiar;
- Correlacionar a cintilação de amplitude (S_4) com cintilação de fase σ_ϕ; e
- Contribuir com o desenvolvimento do projeto INCT GNSS-NavAer ampliando os conhecimentos acerca da cintilação ionosférica.

1.3. Justificativa

Apesar de muitos estudos, a ionosfera na região brasileira ainda é um dos grandes problemas no posicionamento e navegação. Estudos vem sendo realizados no sentido de mitigar o efeito da cintilação ionosférica no posicionamento, para assim obter melhor acurácia na determinação de coordenadas.

Dentro deste contexto, o projeto denominado INCT GNSS NavAer fomentado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia, trata do estudo de métodos de posicionamento e navegação com aplicação de técnicas para mitigar os erros no posicionamento, auxiliando assim a navegação aérea no Brasil.

Logo, o presente trabalho visa analisar a ocorrência da cintilação ionosférica na região brasileira, bem como identificar padrões de ocorrência, tanto quanto a variação temporal (considerando os ciclos solares, a sazonalidade, e a variação diurna) quanto a variação espacial.

1.4. Conteúdo do trabalho

Este documento de dissertação está organizado em sete capítulos, de modo que no segundo capítulo é apresentada uma breve revisão sobre os sistemas de posicionamento, observáveis GNSS bem como os métodos de posicionamento. O capítulo 3 traz um levantamento bibliográfico sobre a ionosfera, TEC bem como as anomalias que influenciam para que a ionosfera apresente características distintas na região brasileira. No capítulo 4 é abordada a ionosfera, tratando dos efeitos que ela causa no posicionamento, como a refração e cintilação ionosférica, sendo essa última dividida em dois subtópicos: cintilação em amplitude e cintilação em fase.

No capítulo 5 pode-se encontrar a metodologia aplicada no trabalho. Já no capítulo 6 encontra-se as discussões dos resultados obtidos, os quais contém análises a respeito da ocorrência de cintilação em amplitude e cintilação em fase, destacando-se as variações temporais e espaciais da cintilação. O capítulo 7 traz uma sumarização do trabalho bem como as conclusões.

2. POSICIONAMENTO GNSS

Neste tópico será realizada uma breve revisão sobre os sistemas de posicionamento por satélites GNSS(GNSS – *Global Navigation Satellite System)*, bem como os métodos de posicionamento por satélite.

2.1. Sistemas de posicionamento GNSS

Posicionar, de acordo com Monico (2008), é determinar a posição. Para determinação da posição por meio do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System)* é necessário que o usuário possua um receptor destes sinais e que tenha disponível satélites de um ou mais sistemas GNSS. Atualmente, tem-se como sistemas globais de navegação por satélite o GPS (*Global Positining System)* que é de origem norte americana, o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)* que foi desenvolvido pela ex-União Soviética e atualmente é de responsabilidade Russa, o Galileo da União Europeia, e em processo de desenvolvimento há o chinês Beidou/Compass. Além destes ainda existem os sistemas de aumento chamados SBAS - *Satellite Based Augmentation System* (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

O sistema norte-americano GPS, conta com 24+7 satélites dispostos em seis planos orbitais, com inclinação de 55°, altitude de 20.180 km e suas coordenadas associadas ao WGS (*World Geodetic System*) 84. Atualmente os satélites desta constelação transmitem dados para uso civil em três bandas: L1 onde os dados são transmitidos com frequência de 1.575,42 MHz, L2 com 1.227,60 MHz de frequência e em L5 que possui uma frequência de 1.176,45 MHz (TEUNISSEN; MOUNTENBRUCK, 2008).

Durante o período da Guerra Fria, a extinta União Soviética também desenvolveu um sistema global de posicionamento por satélite, o GLONASS. Este sistema possui 24 satélites, divididos em três planos orbitais, com inclinação de aproximadamente 60,8°, altitude de 19.140 km e seu sistema de referência é o PZ-90 (*Parametry Zemli* 1990) (TEUNISSEN and MOUNTENBRUCK, 2008). Em relação a frequência da transmissão de sinais, o GLONASS utiliza a *Frequency Division Multiple Access* - FDMA onde cada satélite transmite em uma frequência diferente, baseada em uma frequência fundamental (f_0). Para L1 a frequência fundamental é de 1.602,00 MHz, em L2 1.246,00 MHz e em L3 1.204,7040 MHz (HOFMANN-WELLENHOF *et al*., 2008).

Diferente dos outros dois sistemas já citados, o sistema de posicionamento da união europeia foi concebido desde o início para uso civil. O Galileo possui atualmente 22 satélites operacionais (ESA, 2019), divididos em três planos orbitais com inclinação de 56° com suas coordenadas referenciadas ao GTRF (*Galileo Terrestrial Refeence Frame*). Seus dados são transmitidos ao usuário pelo método *Code Division Multiple Access* – CDMA, análogo ao GPS, onde todos os satélites possuem as mesmas frequências. A banda E1 possui frequência de 1575,45 MHz, já a banda E6 transmite dados a 1278,75 MHz, em E5 tem-se dados transmitidos a 1191,79 MHz e em E5a e E5b tem-se dados transmitidos a 1176,45 MHz e 1207,14 MHz, respectivamente (TEUNISSEN and MOUNTENBRUCK, 2008). Nota-se que a banda E1 possui frequência muito próxima a banda L1 do sistema GPS e a banda E5a possui a mesma frequência de transmissão de dados que a banda L5 do sistema norte-americano.

O sistema chinês Beidou/Compass, conta com satélites geoestacionários e satélites geossíncronos, além dos satélites MEO para posicionamento global. O sistema possui 27 satélites operacionais, divididos em 3 planos orbitais a uma altitude de aproximadamente 21.500 km e inclinação de 55,5° (TEUNISSEN and MOUNTENBRUCK, 2008). O sistema de referência o qual suas coordenadas estão associadas é o CGS200 (*China Geodetic System* 2000). Se tratando da transmissão dos sinais tem-se as bandas B1 que transmite dados com frequência de 1.589,74 MHz, B2 com 1.156,1 MHz e B3 que transmite dados a uma frequência de 1.268,52 MHz (BEIDOU, 2019).

Como sistemas de aumentos tem-se o *Wide Area Augmentation System* (WAAS), o EGNOS - *European Geostationary Navigation Overlay Service*, *Multifunction Satellite Augmentation System* (MSAS), G*PS Aided GEO Augmented Navigation* (GAGAN), *BeiDou Satellite-Based Augmentation System* (BDSBAS), *Korean Augmentation Satellite System* (KASS), entre outros (TEUNISSEN and MOUNTENBRUCK, 2008).

2.2. Observáveis GNSS

Segundo Seeber (2003), é possível posicionar um objeto na superfície terrestre com a pseudodistância a partir do código e a fase da onda portadora, sendo estas as observáveis básicas do GNSS. Além destas, outras observáveis ainda são disponibilizadas como é o caso da variação Doppler e o SNR (*Signal to Noise Ratio*), por exemplo (MONICO, 2008). A seguir serão descritas as duas observáveis mais utilizadas no posicionamento GNSS, bem como os erros que as afetam.

2.2.1. Pseudodistância

De acordo com Monico (2008), a pseudodistância (PD) é igual a diferença de tempo registrado no receptor no instante de recepção do sinal (t_r) e o tempo registrado no satélite no instante de transmissão do sinal (t^s), multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (c). A pseudodistância pode ser dada pela equação (1):

$$PD_r^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + \varepsilon_{PD_r^s}, \quad (1)$$

onde,

PD_r^s - pseudodistância;

ρ_r^s - distância geométrica entre o satélite, no instante de transmissão do sinal, e o receptor, no instante de recepção do sinal;

c - velocidade da luz no vácuo;

dt_r - erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante de recepção;

dt^s - erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante de transmissão;

I_r^s - erro devido à ionosfera;

T_r^s - erro devido à troposfera;

dm_r^s - erro devido ao multicaminho; e

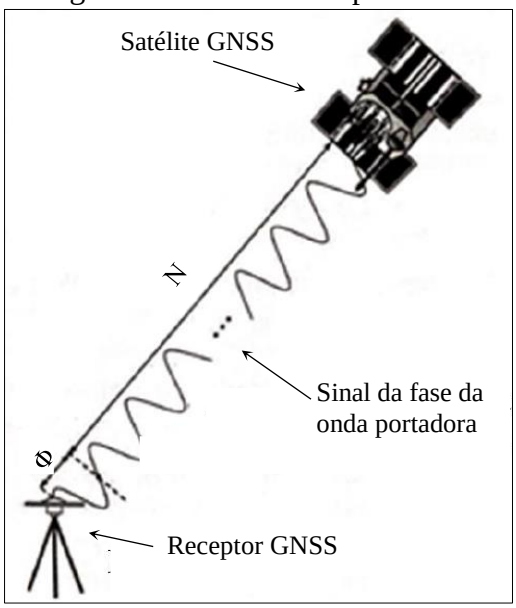
$\varepsilon_{PD_r^s}$ - erro da pseudodistância devido aos efeitos sistemáticos não modelados (relatividade, atraso entre duas portadoras no hardware do satélite e do receptor, fase wind-up, rotação da Terra, dentre outros) e aleatórios, bem como a cintilação ionosférica.

Para aplicações de posicionamento onde não é necessária alta acurácia, utiliza-se apenas a pseudodistância, no entanto para a maioria das aplicações geodésicas utiliza-se a fase da onda portadora que é muito mais precisa que a pseudodistância (MONICO, 2008).

2.2.2. Fase da onda portadora

A fase da onda portadora, é entendida como a diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerado no receptor, no instante de recepção (MONICO, 2008). Os receptores medem apenas uma parte fracionária da portadora e realizam a contagem do número de ciclos que entram no receptor. O número inteiro de ciclos (N_r^s) é contado do instante da primeira observação entre as antenas e é denominado ambiguidade. A ambiguidade é estimada juntamente com os demais parâmetros no ajustamento. A Figura 2 ilustra a fase da onda portadora, a medida fracionária captada pelo receptor, bem como a ambiguidade.

Figura 2 - Fase da onda portadora



Fonte: Adaptado de Monico (2008)

A fase da onda portadora pode ser escrita de acordo com o modelo funcional apresentado na equação (2) (MONICO, 2008):

$$\Phi_r^s(t) = f\left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + dm_r^s}{c}\right) + f[dt_r(t) - dt^s] + [\Phi_r^s(t_0) - \Phi_r(t_0)] + N_r^s + \varepsilon_{\Phi_r}^s \ , \quad (2)$$

onde,

f - frequência nominal da fase da onda portadora;

$\Phi^s\ (t_0)$ - fase inicial do satélite no instante t_0;

$\Phi_r\ (t_0)$ - fase inicial do receptor no instante t_0;

N_r^s - ambiguidade da fase; e

$\varepsilon_{\Phi_r}^s$ - erro da fase devido aos efeitos sistemáticos não modelados (relatividade, atraso entre duas portadoras no hardware do satélite e do receptor, fase *wind-up*, rotação da Terra, dentre outros) e aleatórios.

Comparando as equações da fase e da pseudodistância é possível observar que o efeito causado nestas observáveis devido a ionosfera possui o sinal oposto, enquanto na fase a ionosfera causa um avanço, na pseudodistância causa um atraso (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008).

2.2.3. Erros nas observáveis

Assim como todas as medidas possuem erros, as observáveis GNSS possuem erros que influenciam na qualidade. Estes erros são comumente divididos em erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios. Os erros grosseiros são aqueles que provém de falhas humanas

ou instrumentais, geralmente de maior magnitude e devem ser detectados e eliminados. Já os erros sistemáticos são aqueles que possuem causa conhecida e por este motivo devem ser minimizados ou até mesmo eliminados por meio de técnicas apropriadas ou modelagem matemática. Já os erros aleatórios não possuem qualquer relação funcional com as observáveis e por isso são considerados inerentes as observações, não sendo possível sua minimização (MONICO, 2008).

Nas observáveis GNSS alguns erros sistemáticos podem ser modelados. A Tabela 1 apresenta alguns destes erros bem como suas possíveis fontes:

Tabela 1 - Fontes e erros sistemáticos

Fontes	**Erros**
Satélite	Erro da órbita
	Erro do relógio
	Relatividade
	Atraso entre duas portadoras no hardware do satélite
	Centro de fase da antena do satélite
	Fase *wind-up*
Propagação do Sinal	Refração troposférica
	Refração ionosférica
	Perdas de ciclos
	Multicaminho ou sinais refletidos
	Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio
	Erro entre os canais
	Centro de fase da antena do receptor
	Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor
	Fase *wind-up*
Estação	Erro nas coordenadas
	Multicaminho ou sinais refletidos
	Marés terrestres
	Movimento do polo
	Carga oceânica
	Pressão atmosférica

Fonte: Adaptado de Monico (2008)

Sobre a estação, é possível observar que alguns destes erros não são necessariamente erros, mas sim efeitos causados pela dinâmica terrestre, como é caso das marés terrestre, cargas oceânicas entre outros (MONICO, 2008).

Além da modelagem matemática, alguns erros podem ser minimizados pela utilização de receptores de mais de uma frequência ou ainda por métodos de posicionamento que permitem que tais erros sejam cancelados.

2.3. Métodos de posicionamento GNSS

Para determinar a posição de um objeto tem-se diversos métodos que variam de acordo com acurácia requerida, quantidade de receptores disponíveis, estado do objeto (estático ou em movimento), rapidez na obtenção das coordenadas entre outros.

2.3.1. Posicionamento por ponto simples e preciso

No posicionamento por ponto simples, o usuário precisa de apenas um receptor com pelo menos quatro satélites visíveis. Este método é bastante utilizado em aplicações de baixa precisão, como por exemplo navegação ou levantamentos expeditos. Para o posicionamento por ponto utiliza-se como observável fundamental a pseudodistância derivada do código C/A da portadora L1 e caso esteja disponível pode-se incluir a fase da onda portadora.

Neste método de posicionamento utiliza-se de efemérides transmitidas sendo assim as coordenadas estão referenciadas ao sistema GNSS, por exemplo, no caso do sistema GPS é o WGS84, GLONASS tem como referência o Pz-90, o Galileo possui como referência o GTRF e o Beidou/Compass é referenciado ao CGS2000. As efemérides transmitidas além de fornecer as informações sobre o sistema de referência e os elementos keplerianos para o cálculo das coordenadas dos satélites, também disponibilizam ao usuário as informações do relógio dos satélites, que é de extrema importância para a determinação da posição (MONICO, 2008).

Os erros provindos da ionosfera e troposfera são normalmente negligenciados, no entanto modelos como de Klobuchar e Hopfield podem ser aplicados para a modelagem desses erros, minimizando os erros de primeira ordem que interferem no posicionamento. O posicionamento por ponto simples oferece ao usuário uma acurácia métrica e como utiliza-se de efemérides transmitidas e modelos matemáticos, as coordenadas podem ser obtidas em tempo real.

No posicionamento por ponto preciso (PPP) o usuário pode dispor de apenas um receptor, assim como no posicionamento por ponto simples, no entanto aqui os erros referentes a atmosfera devem ser modelados.

Neste método, as efemérides utilizadas devem ser as efemérides precisas, que são disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*) ou outras agencias. As efemérides precisas podem ser ultrarrápidas, rápidas e finais divergindo entre elas a latência e a acurácia (IGS,2019).

No PPP pode-se utilizar receptores de simples ou de dupla frequência. No caso do uso de receptores de simples frequência acurácia é menor devido principalmente ao efeito ionosférico, pois os demais erros podem ser tratados do mesmo modo em situações em que se tenha observações de dupla frequência (MONICO, 2008).

O PPP em tempo real é o que se tem de estado da arte quando se trata de posicionamento, uma vez que ele une a acurácia de um posicionamento mais preciso que o posicionamento por ponto simples com a rapidez na determinação das coordenadas em tempo real. No entanto, apesar de utilizar-se de efemérides precisas os erros referentes a ionosfera não são modelados.

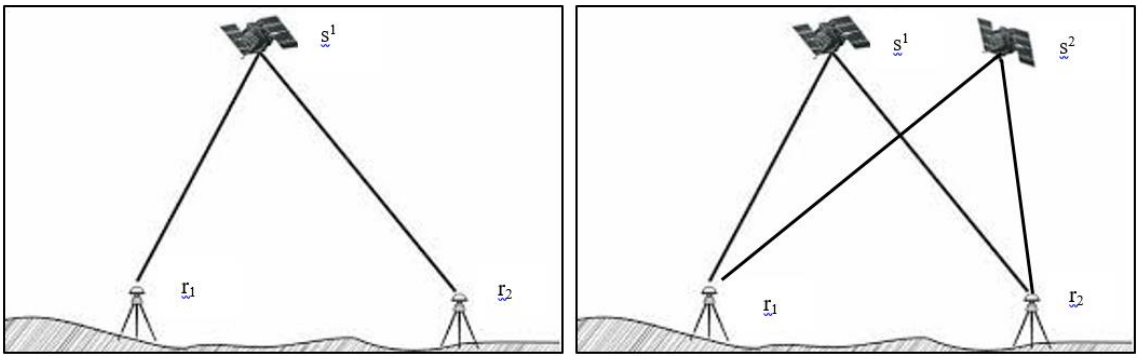
Para se modelar os erros de primeira ordem podem ser utilizados modelos como Klobuchar (1987) ou ainda o Nequick (EC, 2016), porém os outros erros como a cintilação não são modelados, podendo causar erros da ordem de centímetros no posicionamento por ponto (MENDONÇA, 2013).

2.3.2. Posicionamento relativo

No posicionamento relativo o usuário deverá dispor de pelo menos dois receptores ou um receptor e uma estação de pertencente a uma rede monitoramento contínuo, como é o caso da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) que coleta dados 24 horas por dia e disponibiliza via internet.

Como observáveis fundamentais, o posicionamento relativo utiliza-se as duplas diferenças (DD). Uma dupla diferença (Figura 3b) consiste na diferença entre a diferença das observáveis coletadas de dois receptores e transmitidos de dois satélites simultaneamente, eliminando assim erros como por exemplo o erro do relógio das estações, dos satélites dentre outros.

Figura 3 - Simples e duplas diferença



(a) Simples diferença (b) Dupla diferença

Fonte: Adaptado de Gemael e Andrade (2003)

Um dos métodos de posicionamento relativo é o posicionamento relativo estático. Neste método, a observável utilizada é a DD da fase da onda portadora, podendo ser utilizada a DD da pseudodistância, ou a combinação das duas. Neste tipo de posicionamento os dois receptores devem coletar dados simultaneamente por pelo menos 20 minutos, o que faz com que apenas as DDs da fase sejam utilizadas como observáveis. As DDs das pseudodistâncias devem estar disponíveis para a realização de um pré-processamento onde são estimados o erro do relógio do receptor (MONICO, 2008). Ainda segundo Monico (2008), a precisão do posicionamento relativo estático é de 1,0 ppm (parte por milhão) até 0,1 ppm.

Com características muito similares ao posicionamento relativo estático, tem-se o posicionamento relativo estativo rápido. Neste método, um dos receptores é fixado como base e o outro ocupa os pontos de interesse, sendo o tempo de coleta deste último menor que 20 minutos e maior que 5 minutos, o que permite ao usuário alta produtividade nos levantamentos mesmo com obstruções entre as estações. É válido ressaltar que a distância entre os dois receptores deve ser curta, ou seja, menor que 10 km, considerando condições normais este método propicia precisão de 5 ppm podendo chegar a 1 ppm.

Ainda no posicionamento relativo, tem-se o relativo semicinemático onde usuário ocupa duas estações, sendo uma delas considerada como base e o outro como móvel (rover). Assim, o receptor base coleta dados continuamente por aproximadamente 20/30 minutos, enquanto o outro percorre os pontos de interesse por poucos segundos. A diferença deste método para o método relativo estático, é que aqui o receptor móvel não é desligado entre um ponto ocupado e outro, sendo assim não havendo perda de ciclos, o vetor das ambiguidades pode ser solucionado apenas uma vez, a partir de técnicas especificas, permitindo que o usuário tenha alta produtividade com a acurácia do

posicionamento relativo estático rápido. É importante lembrar que neste método não se deve ter a perda da sintonia do receptor com satélite (MONICO, 2008).

No posicionamento relativo quando se tem interesse na trajetória do objeto utiliza-se o método cinemático, que pode ser pós-processado obtendo as coordenadas posteriormente a coleta ou em tempo real, onde as coordenadas são obtidas no momento da coleta. Neste método, tem-se um receptor como base e o outro que se desloca sobre as feições de interesse, se o período do levantamento for de aproximadamente 20 minutos, o vetor das ambiguidades pode ser solucionado junto com as coordenadas. Em tempo real, além dos receptores, deverá haver comunicação entre a estação base e o rover, uma vez que a estação base deverá calcular correções e enviar ao receptor móvel, bem como este deverá ser capaz de solucionar as ambiguidades quase que instantaneamente.

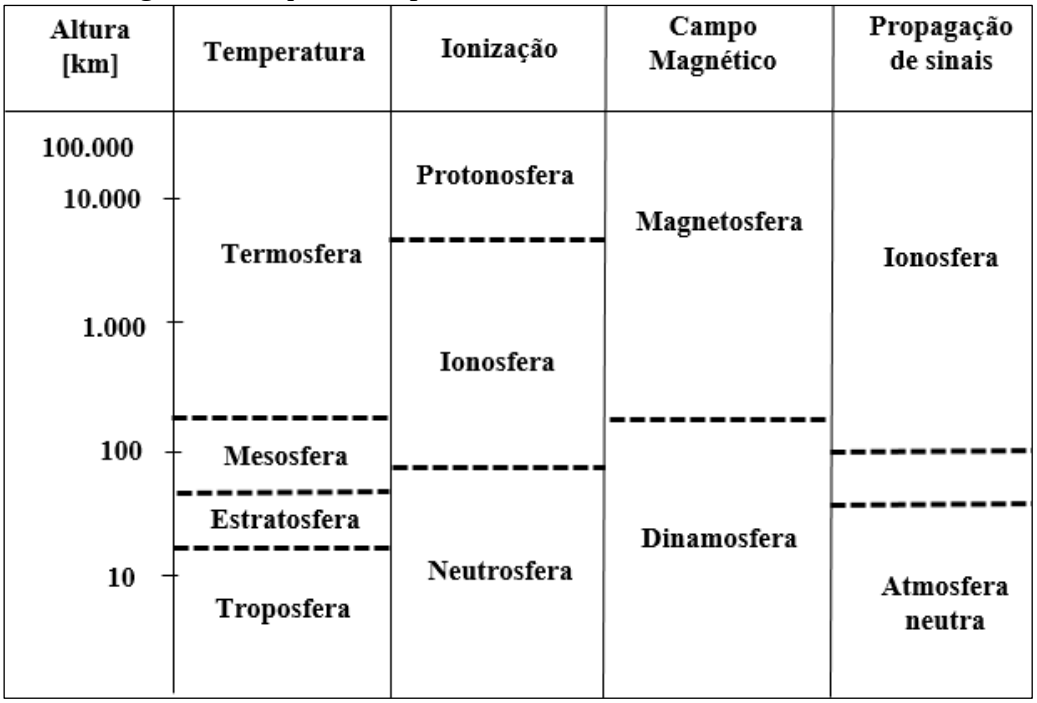
No posicionamento relativo, o erro devido a cintilação ionosférica pode chegar em torno de 20cm a 60 cm dependendo do método que se aplica e da distância entre as duas estações utilizadas para determinar a posição, sendo imprescindível o conhecimento do comportamento da cintilação para evitar os períodos de maior cintilação.

3. IONOSFERA

A atmosfera terrestre é composta por uma camada de gases, esférica que envolve o planeta e é atraída pela Terra. A estrutura da atmosfera terrestre está relacionada com fatores químicos e físicos, onde seus valores são diretamente afetados pela latitude, estação do ano, horário, longitude, atividade e ciclo solar (CAMARGO, 1999; SEEBER 2003).

As camadas atmosféricas podem ser divididas de acordo com a temperatura, ionização, campo magnético e propagação de sinais. A Figura 4 apresenta um esquema de possíveis divisões da atmosfera terrestre quanto a estes fatores.

Figura 4 - Esquema de possíveis divisões da atmosfera terrestre



Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

Para este trabalho a divisão mais adequada é aquela que está relacionada propagação de sinais. Assim, quando se trata de propagação de sinais a atmosfera é dividida em atmosfera neutra (ou troposfera) e ionosfera.

A atmosfera neutra é a camada compreendida entre a superfície terrestre até, aproximadamente, 50 km de altura e sua constituição é baseada em partículas neutras (SEEBER, 2003). Segundo Sapucci, (2001), a maior concentração de gases ocorre até aproximadamente 12 km, contendo vapor d'água, nitrogênio, dióxido de carbono e outros compostos. De acordo com Leick (1995) a propagação de sinais abaixo de 30 GHz nesta

camada depende apenas do vapor d'água, temperatura e pressão atmosférica, caracterizando assim um meio não dispersivo para a propagação de sinais GNSS.

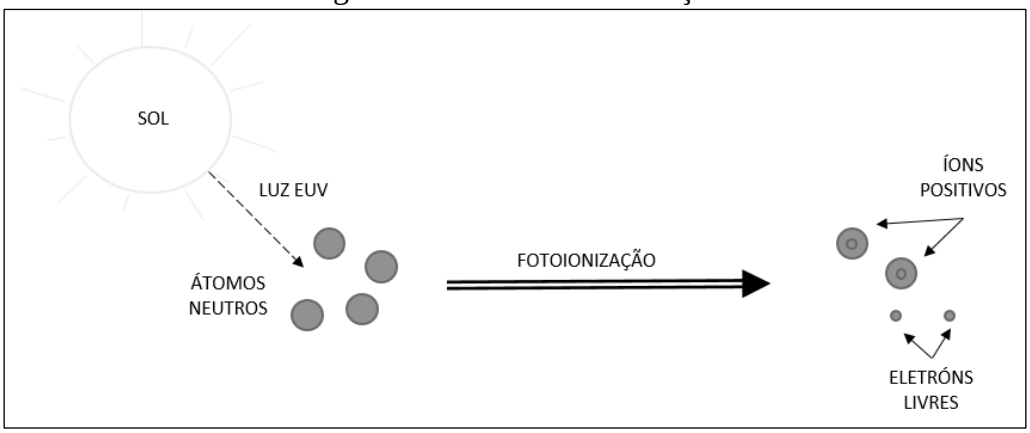
Já a ionosfera, camada superior da atmosfera que vai de aproximadamente, 50 km até 1.000 km é composta por partículas ionizadas. Nesta camada a propagação do sinal depende da frequência, sendo assim um meio dispersivo para os sinais GNSS (CAMARGO, 1999).

3.1. Características Gerais

A ionosfera é formada quando a luz no espectro do ultravioleta (EUV) separa os elétrons dos átomos neutros na atmosfera terrestre. Devido à grande quantidade de energia presente na luz EUV, uma quantidade condensada dessa energia (fóton) pode ser transmitida aos elétrons, fazendo com que estes possam se separar dos átomos que faziam parte anteriormente. Assim, o átomo se torna uma partícula positiva, podendo ser chamado de cátion ou íon positivo (HALLIDAY e RESNICK, 1992).

Este processo, onde o elétron é separado de um átomo neutro por um fóton é chamado de fotoionização (Figura 5).

Figura 5 - Processo de ionização



Fonte: Adaptado de McNamara (1991)

Além do processo de fotoionização, na atmosfera também ocorre o processo de recombinação onde os elétrons e os íons com carga positiva se juntam para formar novamente os átomos de carga neutra, fazendo com que os elétrons se percam na parte superior da ionosfera. Na parte inferior da ionosfera os elétrons se juntam a átomos nêutrons formando assim ânions, íons de carga negativa (McNAMARA, 1991).

Devido aos processos de fotoionização e recombinação a ionosfera apresenta diferentes níveis de concentração de elétrons, podendo ser dividida nas camadas D, E e

F, essa última dividida em F_1 e F_2, após estas camadas a densidade de elétrons diminui até se juntar ao vento solar (CAMARGO, 1999).

Na primeira camada ionosférica, com altitude de até, aproximadamente, 85 km, a concentração máxima de elétrons ocorre a, mais ou menos, 80 km sendo da ordem de 10^3 el/cm³ (elétrons/cm³). Durante a noite, devido ao processo de recombinação, esta camada desaparece. Na propagação de ondas de média frequência (MF), ondas altas e muito altas (HF e VLF) a camada D absorve a energia eletromagnética, já no caso de ondas de baixa frequência e muito baixa (LF e VLF) ele atua como refletora destes sinais (DAVIES, 1990; CAMARGO, 1999).

Entre as altitudes de 85 km e 140 km, aproximadamente, e com concentração de 10^5 el/cm³ tem-se a camada E. Próximo ao meio dia local, esta camada apresenta maior densidade de elétrons com comportamento quase simétrico ao longo dia. Nas altitudes de 90 km até 120 km, ocorrem variações na densidade de elétrons formando uma fina camada chamada de camada E esporádica (E_s). Estas variações são causadas devido a elétrons que recebem energia a partir da magnetosfera ou outros fenômenos físicos. A região próxima ao equador magnético possui um comportamento regular, com pouca variação sazonal. A camada E_s ocorre a noite em regiões de alta latitude e durante o dia em regiões próximas ao equador, podendo conter o dobro ou até mesmo o triplo de concentração eletrônica que a camada E. Em relação a propagação de ondas, ondas eletromagnéticas acima de 100 MHz são refletidas na camada E_s (DAVIES, 1990).

Na região F_1, compreendida entre 140 km e 200 km de altitude, a densidade de elétrons varia de acordo com a atividade, ou seja, com a quantidade de radiação solar recebida. A concentração de elétrons nessa região varia de $2x10^5$ el/cm³ $4x10^5$ el/cm^3. Já camada F_2 está entre 200 km e 1000 km ou 2000 km dependendo do fluxo solar (CAMARGO, 1999). A altitude máxima de concentração de elétrons nesta região varia de acordo com o ciclo solar, latitude e com a hora local. No período noturno, ocorre a chamada camada *spread* F que se dá porque a concentração de elétrons nesta região é difusa, o que provoca uma variação na densidade de elétrons, afetando assim os sinais de rádio por um efeito conhecido como cintilação ionosférica. Davies (1990) destaca que estas irregularidades na densidade de elétrons são importantes na propagação de ondas de rádio de HF e VHF, como é o caso da comunicação marítima.

As partículas ionizadas crescem de acordo com a altitude, atingindo um valor de pico e posteriormente decrescem permanecendo constante até o início da camada superior. Todas as camadas, segundo Picquenard (1974), variam de altitude e densidade

devido a atividade solar, seja ela diária, anual ou periódica (a cada 11 anos, aproximadamente).

Além da variação de acordo com a atividade solar, a ionosfera ainda varia de acordo com a localização geográfica, hora local, altitude, sazonalidade, tempestades geomagnéticas, dentre outros. A latitude geográfica, hora local e sazonalidade modificam o ângulo que Sol faz com o zênite do local e quantidade de radiação solar incidente é proporcional ao cosseno do ângulo zenital. No entanto, de acordo com Picquenard (1974), devido a não coincidência dos polos geográficos e magnéticos, a longitude influencia apenas as camadas mais altas da ionosfera.

A ionosfera é considerada um meio dispersivo para a propagação de ondas eletromagnéticas, isto é, o índice de refratividade depende da frequência da onda que atravessa. Com isso o estudo da propagação de sinais GNSS na ionosfera não é trivial por conta da variação da condutividade do meio com a frequência (CAMARGO, 1999).

Durante seu caminho do satélite até a antena do receptor, as ondas eletromagnéticas dos sinais GNSS atravessam camadas sofrendo variados tipos de influências, que podem provocar variações na direção de propagação, na velocidade, na polarização bem como na potência do sinal (SEEBER, 1993).

3.2. TEC - (*Total Electron Content*) e suas variações

O efeito da ionosfera na propagação dos sinais GNSS é proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC - *Total Electron Content*), isto é, a quantidade de elétrons presente ao longo do caminho do satélite até o receptor. O grande problema é que o TEC varia no tempo e no espaço, em função do fluxo solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, latitude do usuário, e direção do raio vetor do satélite (LEICK, 1995).

As variações diurnas são provocadas por alterações em algumas regiões da ionosfera que, devido a recombinação de elétrons, desaparecem a noite. Na camada D, a concentração de elétrons diminui e desaparece a noite (DAVIES,1990). Outro fenômeno que ocorre no final da tarde é o desaparecimento da camada E, mas ao nascer do Sol tal camada reaparece imediatamente. A camada F_1 também desaparece a noite, e a camada F_2 sofre uma diminuição na concentração de elétrons, atingindo o valor mais baixo na madrugada, e aumentando rapidamente ao nascer do Sol. Segundo Webster (1993) o principal elemento que colabora para a variação diurna é a radiação solar. Ao decorre do dia, os maiores valores de TEC podem ser encontrados entre 12h e 16h.

As variações sazonais são causadas devido a variação na concentração de elétrons devido às estações do ano, mais especificamente pela mudança do ângulo zenital solar e intensidade do fluxo de ionização. No verão, a radiação que atinge a Terra é mais direta no verão quando comparado com o inverno, fazendo com que ocorra um aumento na ionização (WEBSTER, 1993). No inverno, a camada F_1 pode desaparecer durante o dia e a camada E ser reduzida, porém em médias latitudes há mais ocorrência da camada E_s durante o verão que durante o inverno (CAMARGO, 1999). Já a camada F_2 possui um comportamento muito diferente das outras camadas durante o dia: no inverno esta apresenta um aumento na contração de elétrons, devido a fatores químicos. Nas regiões polares e em médias latitudes esta variação é mais evidente.

A variação do ciclo solar, também chamada de variação de longo período, possui um período de aproximadamente 11 anos e está relacionada a ocorrência de manchas solares, que ocasionam um aumento na ionização. O último pico que foi constatado, ocorreu em 2013-2014, sendo o próximo previsto para 2025, aproximadamente.

Além das mudanças devido ao tempo, o TEC pode variar devido a quantidade de raios ultravioleta emitida pelo Sol que interferem no nível de ionização da atmosfera terrestre, com períodos que pode variar de minutos até semanas (WEBSTER, 1993). Existem três tipos de fenômenos que podem causam essa variação.

O primeiro fenômeno diz respeito as explosões solares, que são fenômenos pontuais chamados de súbito distúrbio ionosférico (*Sudden Ionospheric Disturbance* - SID), causado devido um aumento de energia na superfície solar sendo emitida por meio dos raios X e ultravioleta. Tal evento possui curta duração, de minutos até poucas horas, e é associado ao aumento da concentração de elétrons na parte inferior da camada D. As regiões mais altas (E e F) não apresentam variações provocadas por este distúrbio (CAMARGO, 1999).

Já o segundo fenômeno é provocado devido ao buraco na coroa solar, que são as fontes das correntes dos ventos solares de alta velocidade, mais comuns em períodos onde há uma diminuição do fluxo solar e que causam tempestades ionosféricas. Os ventos solares saem dos buracos na coroa, e as partículas que são emitidas pelo Sol apresentam uma aceleração, causando um considerável aumento na velocidade.

O terceiro fenômeno que interfere no nível de ionização da atmosfera terrestre, ocorre devido as manchas solares. Seu período pode variar de poucos dias até semanas. Tais manchas possuem uma borda mais brilhante que emitem raios ultravioleta em um nível mais elevado.

Outro fator que influencia na variação da concentração de elétrons é a localização geográfica. Segundo Piquenard, (1974) a longitude não possui influência sobre a ionosfera, apenas nas regiões mais altas da ionosfera. Nas regiões equatoriais possuem uma grande concentração de elétrons, enquanto as regiões de latitudes médias são consideradas livres de anomalias e as regiões polares não são previsíveis (CAMARGO, 1999).

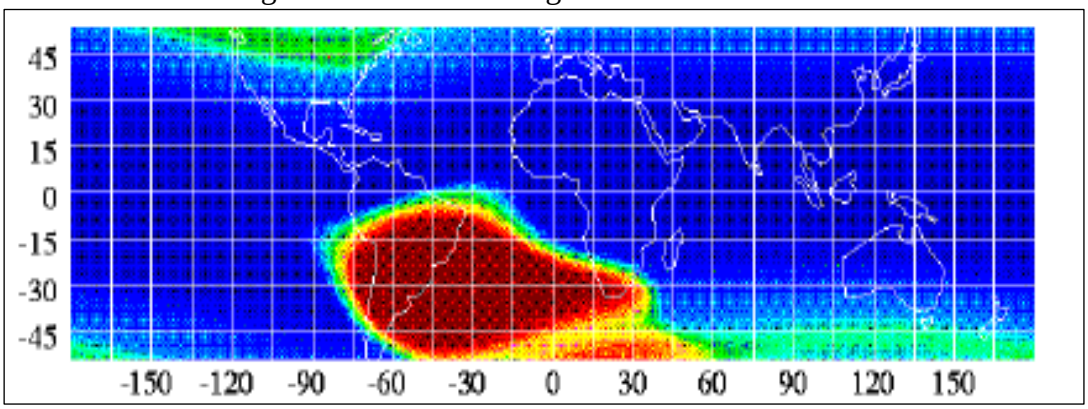
Além destes efeitos que causam variação na concentração de elétrons, ainda pode-se destacar as anomalias devido ao campo eletromagnético terrestre e ou efeito fonte, que serão discutidos a seguir.

3.2.1. Anomalia Magnética do Atlântico Sul

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul é um fenômeno que enfraquece o campo magnético na região. Esta anomalia é única no planeta e se concentra sobre uma pequena porção planetária e tem uma grande intensidade.

Seu centro atual é em torno de Santa Catarina (Brasil) e se estende longitudinalmente (Figura 6). A origem da anomalia se dá no mesmo local de formação do campo magnético terrestre e é formada pela existência de polos enfraquecidos no sistema líquido caótico de compressão e que ainda está distante de ser desvendada, mas que todo o sistema geomagnético está derivando para oeste devido a uma diferença entre o manto e o núcleo terrestre. Esta anomalia possui dinâmica temporal geológica de cerca de 1000 anos.

Figura 6 - Anomalia Magnética do Atlântico Sul



Fonte: NASA (2019)

A anomalia gera localmente um campo magnético de sentido oposto ao campo magnético terrestre, enfraquecendo-o o que pode ser provado pela depressão das linhas do campo eletromagnético terrestre medidas localmente ou ainda com dados oriundos de

satélites. Segundo Hartman e Pacca (2009), as diferenças encontradas nesta região para o resto globo vem diminuindo cada dia mais desde que se obteve as primeiras observações.

Devido ao campo magnético possuir menor intensidade que o seu entorno, as partículas energizadas que normalmente se encontrariam na região F, descem para a região D da ionosfera, causando o efeito de ionização em uma quantidade ainda maior de partículas neutras, aumentando assim a quantidade de elétrons livres presentes na região (JASKULSKI *et al*., 2006).

De acordo com Abdu (2001), a AMAS apresenta importante influência nas condições para que existam irregularidades nas camadas E e F da ionosfera, contribuindo para a formação da camada *Spread* F.

3.2.2. Anomalia Equatorial

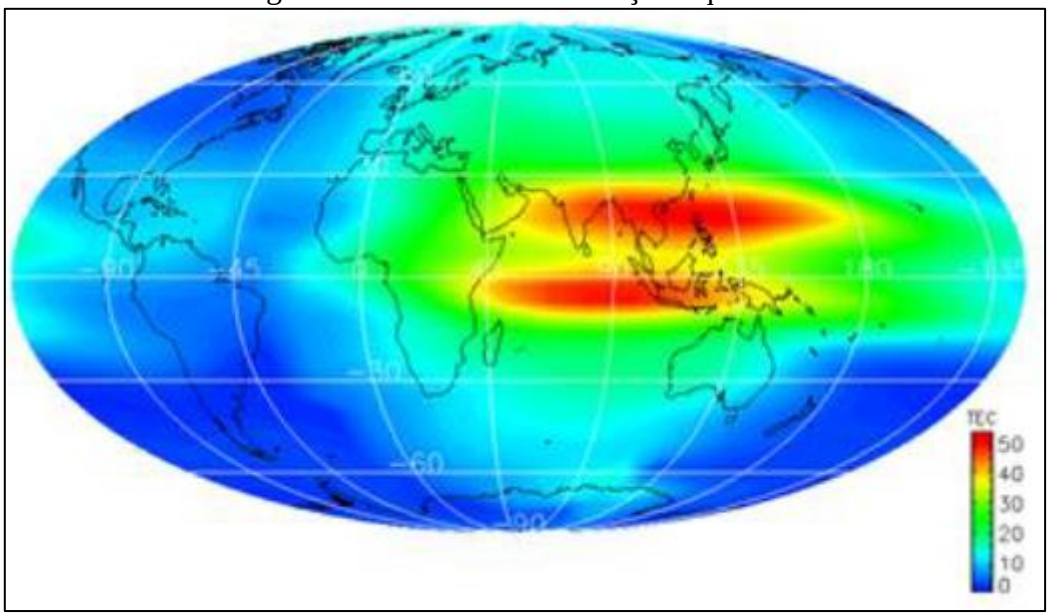
Além da AMAS, a região brasileira ainda se encontra sob efeito da Anomalia de Ionização Equatorial ou Anomalia *Appleton*. Como a ionização das camadas mais altas da ionosfera se dá devido a radiação solar que incide sobre a atmosfera, era esperado que nesta região houvesse maior quantidade de íons, pois recebe mais radiação solar, no entanto isso não ocorre. As linhas do campo magnético, na região equatorial, se encontram quase paralelas a superfície e devido ao campo elétrico da Terra, fazendo com que os íons tenham uma velocidade perpendicular aos campos (Eq. 2)(KELLEY, 2009):

$$V = \frac{E \, x \, B}{B^2} \tag{2}$$

onde B é o vetor do campo magnético, E é o campo elétrico pelo movimento das partículas ionizadas.

A velocidade resultante e a força adquirida fazem com que esses íons sejam lançados para cima e, mais tarde, por causa da força da gravidade e da mudança na força resultante, são puxados de volta formando o chamado efeito fonte, onde os íons caem sobre a superfície, aproximadamente a 15° de latitude magnética, sendo esse local chamado de crista da Anomalia Equatorial. Este efeito é responsável por grandes variações na densidade eletrônica ionosférica (KELLEY, 2009). A Figura 7, apresenta um mapa de densidade eletrônica, onde é possível observar o efeito da Anomalia de Ionização Equatorial.

Figura 7 - Anomalia de Ionização Equatorial



Fonte: NASA/GSFC (2019)

Assim, devido a Anomalia de Ionização Equatorial e a Anomalia magnética do Atlântico Sul, nessa região a ionosfera tem um comportamento diferente das outras regiões, tendo como agravante o surgimento de bolhas de irregularidades ionosféricas, evento que também proporciona no sinal GNSS o efeito de cintilação ionosférica.

3.2.3. Distúrbios magnéticos

Os distúrbios que ocorrem no campo magnético causados por fontes externas que podem durar desde poucas horas até vários dias, são chamadas de tempestades magnéticas. Estes distúrbios podem ocorrer desde algumas horas até muitos dias (DAVIES, 1990).

Quando ocorrem eventos de distúrbios na atmosfera terrestre, a atividade ionosférica aumenta. Segundo Davies (1990), esses distúrbios causam efeitos mais intensos nas regiões de alta latitude, podendo gerar correntes elétricas de até 1 milhão de amperes, e se forem mais intensas, movem-se em direção ao equador magnético. Com essas variações, o campo magnético sofre alterações passando pelo início abrupto, fase inicial, fase principal e recuperação. Assim, a variação no campo magnético pode ser medida com o índice global Kp, o índice D_{ST} e o índice AE.

Sugerido por Sugimura (1964), o índice D_{ST} é calculado com estações de monitoramento próximas ao equador, é utilizado para observar o comportamento em baixas latitudes e apresenta quanto a componente horizontal do campo magnético nesta

região variou em relação a uma média histórica. Quanto menor o índice, significa que mais partículas energizadas estão entrando na Terra influenciando a ionosfera.

O índice Kp, proposto por Bartels *et al* (1939), representa o efeito magnético das correntes em latitudes médias. Este índice é obtido da integração dos resultados de algumas estações de monitoramento localizadas entre ±48° e ±63°, e é disponibilizado a cada 3 horas, em uma escala adimensional de 0 a 9. O índice é dado por uma medição na variação de amplitude da intensidade do campo elétrico, tal variação é chamada de R. A Tabela 2 apresenta a relação entre o índice Kp e a variação R.

Tabela 2 - Relação índice Kp com variação R

Kp	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R	5	10	20	40	70	120	200	330	500	

Fonte: Adaptado de Davies (1990)

Além do índice Kp há também o índice Ap, que apresenta uma média diária ou até mesmo mensal do índice Kp, variando de 0 a 400. O índice AE (*Auroral Electrojet Index*) é obtido por meio de estações localizadas próximo a região auroral, com o mesmo objetivo do índice Kp (DAVIES, 1990). O cálculo do índice AE é dado pela amplitude de todas as medidas provindas das diversas estações. Além disso é disponibilizado o índice AO que traz os valores mínimos e máximos. O índice AE é considerado o mais adequado para se analisar a ocorrências de tempestades solares (McNAMARA, 1991).

3.3. Irregularidades e bolhas ionosféricas

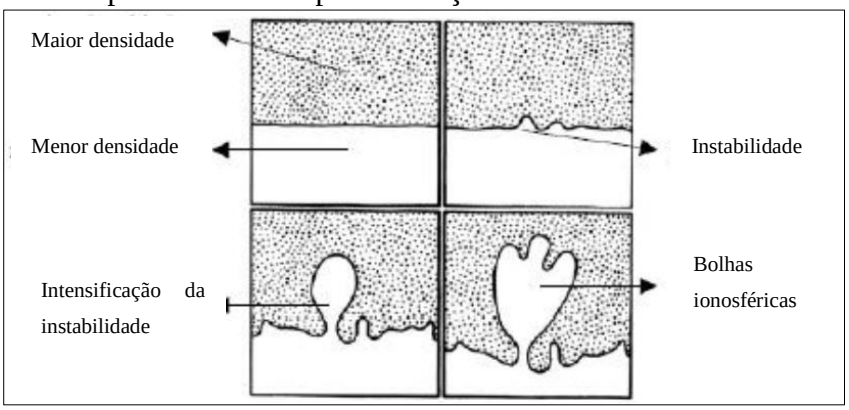
As irregularidades ionosféricas são compreendidas como perturbações na densidade do plasma ionosférico, que dão início devido à instabilidade de plasma do tipo Rayleigh-Taylor (R-T), comumente presente na região equatorial e de baixa latitude ionosférica (PIMENTA, 2003). O primeiro pesquisador a levantar a teoria que a instabilidade R-T causava a camada F espalhada (ESF - *Equatorial Spread F*) foi Dungey (1956). O nome da camada se dá justamente devido ao espalhamento causado pelas irregularidades ionosféricas nos traços de ionogramas equatoriais e de baixa latitude. Porém essa teoria foi descartada, pois explicava apenas a geração de estruturas na parte inferior do perfil de densidade de plasma da camada F, no entanto mais tarde a teoria foi aprimorada com a inclusão de parâmetros como o campo elétrico e a ação dos ventos neutros, sendo denominada de teoria da instabilidade R-T generalizada, onde muitas características da ESF podem ser explicadas. Diversos estudos foram realizados

abordando esse tema (CANDIDO, 2008; ABREU et al 2008; SOUZA, 2019 entre outros) bem como as influências dessas irregularidades no posicionamento (MATSUOKA, 2008; SOUZA, 2015; PEREIRA, 2015 e 2018 dentre outros), podendo observar que essas irregularidades possuem grandes flutuações na densidade do plasma, podendo ser de centenas de quilômetros e causar danos severos no posicionamento e até mesmo impedir que a coordenada seja determina com alta acurácia.

Ao final da tarde, ocorre uma instabilidade que se dá devido a uma rápida subida da camada F, que ocasiona gradientes abruptos de densidade da camada F, que origina a instabilidade do plasma ionosférico. Tal instabilidade causa irregularidades ionosféricas de diversas escalas de tamanho, que vão de alguns centímetros até centenas de quilômetros, sendo as irregularidades de grande escala denominada de plasma (HAASE et al, 2011). Sendo assim, as comunicações que se utilizam dessa faixa para emissão e recepção de sinais podem ser atingidas diretamente, o que permite que as irregularidades sejam estudadas por diversos instrumentos, como ionossondas, radar de espalhamento, imageador óptico ou ainda os receptores GNSS (ABREU, 2012).

A Figura 8 apresenta a evolução de uma instabilidade ionosférica, ocasionando bolhas de plasma de acordo com a teoria Rayleigh-Taylor. Observa-se que um meio com maior densidade está sobre um outro de menor densidade, havendo uma região de equilíbrio devido a ação da gravidade. Caso ocorra uma perturbação na fronteira das duas regiões, quebrando o equilíbrio existente entre as duas camadas de densidade distintas, uma instabilidade é gerada, podendo ser intensificada e originar as bolhas ionosféricas (ABDU et al, 1992). Para que a intensificação da instabilidade ocorra, são necessárias algumas condições como a intensificação dos campos elétricos de dínamo, altitude elevada da ionosfera e a presente de fortes gradientes da densidade eletrônica na base da camada antiparalela à força da gravidade. De acordo com Santos (2001), após a sua formação as bolhas ionosféricas podem alcançar extensões aproximadas de 1000 km na direção latitudinal e cerca de 150 km a 300 km na direção perpendicular.

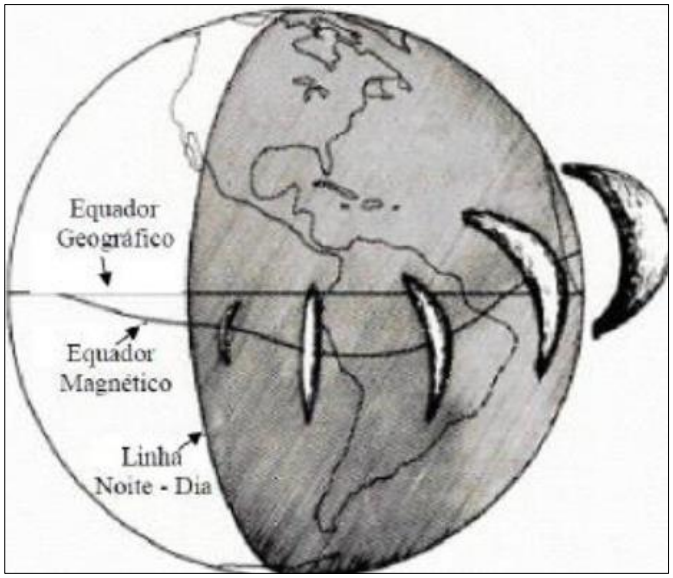
Figura 8 - Bolhas de plasma causada pela evolução de uma instabilidade ionosférica



Fonte: Sobral et al (1999)

As bolhas ionosféricas acontecem com maior frequência após o pôr do sol, pois ocorre uma intensificação do campo elétrico zonal, apresentando uma condição física favorável que geração e evolução das instabilidades do plasma ionosférico. As bolhas se deslocam, geralmente, no sentido oeste-leste, ascendendo em altitude e se deslocando centenas de quilômetros na direção longitudinal, ocasionado pela alta condutividade ao longo das linhas de campo magnético. Na Figura 9 podemos ver o deslocamento de uma bolha ionosférica,

Figura 9 - Deslocamento das bolhas ionosféricas



Fonte: Soares (2001)

Segundo Rodrigues (2004), o início da camada ESF também pode ser ocasionado devido a perturbações do campo elétrico originado em altas latitudes durante tempestades geomagnéticas. As bolhas ionosféricas ocorrem com maior frequência entre os meses de

outubro a março, e variam de acordo com o ciclo solar (SAHAI et al, 2000 apud MATSUOKA, 2007). Ressalta-se que, as bolhas de plasma possuem efeito sobre a propagação de ondas eletromagnéticas devido à alta variação na densidade do plasma ionosférico das bolhas. No interior, as bolhas apresentam uma drástica redução de densidade de plasma, o que ocasiona altos gradientes de elétrons em sua borda, originando irregularidades que por sua vez afeta a propagação de ondas eletromagnéticas quando estas passam por estes locais.

4. EFEITO IONOSFÉRICO NOS SINAIS GNSS

Desde o desligamento da disponibilidade seletiva (SA - *Selective Available*), a ionosfera tem sido a principal fonte de erros no posicionamento (CAMARGO, 1999). A seguir serão apresentados os tópicos referentes a influência da ionosfera na propagação dos sinais GNSS.

4.1. Refração ionosférica

Como já observado na seção 2, a ionosfera é um meio dispersivo para os sinais GNSS, ou seja, o efeito da ionosfera varia de acordo com a frequência do sinal e consequentemente varia de acordo com o índice de refração. O efeito ionosférico é proporcional ao TEC, sendo assim para conhecer o efeito ionosférico bastaria estimar o TEC, porém este possui muitos fatores que influenciam em sua variação fazendo com que o TEC não seja constante, e por consequência dificultando a modelagem dos efeitos ionosféricos.

O índice de refração, quando se afasta do seu valor unitário nas diferentes camadas ionosféricas, torna a velocidade da fase da onda portadora (V_f), que é dada por (HOFMANN-WELLENHOF *et al*., 1993):

$$V_f = \lambda f \tag{3}$$

sofra um retardo, onde λ é o comprimento de onda e f é a frequência do sinal.

Para um grupo de ondas, isto é, medidas de código, a propagação é definida com a velocidade do grupo (V_g) (HOFMANN-WELLENHOF *et al*., 1993):

$$V_g = -\frac{df}{d\lambda}\,\lambda^2 \tag{4}$$

e sofre um avanço na propagação de sinal.

Diferenciando a equação (3) e substituindo na equação (4), temos uma expressão que relaciona a velocidade de grupo com a velocidade da fase, conhecida como equação de *Rayleigh* (CAMARGO, 1999):

$$V_g = V_f - \lambda\frac{dV_f}{d\lambda} \tag{5}$$

Os correspondentes índices de refração para a velocidade de fase e de grupo são dados como:

$$n_f = \frac{c}{V_f} \tag{6}$$

e

$$n_g = \frac{c}{V_g} \tag{7}$$

onde c é a velocidade da luz.

A equação modificada de *Rayleigh* relaciona o índice de refração da fase e do grupo, pode ser dada pela expressão (HOFMANN-WELLENHOF *et al*., 1993):

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda} \tag{8}$$

ou ainda pode ser dada por:

$$n_g = n_f + f \frac{dn_f}{df} \tag{9}$$

pois, partindo da relação $c=\lambda f$, derivando λ em relação a f, tem-se que $\lambda/d\lambda=-f/df$

O índice de refração da fase pode ser aproximado pela série (SEEBER, 1993):

$$n_f = 1 + \frac{C_2}{f^2} + \frac{C_3}{f^3} + \frac{C_4}{f^4} + \frac{C_5}{f^5} \ldots\ldots \tag{10}$$

onde os coeficientes C_2, C_3, C_4, C_5 dependem apenas da densidade de elétrons (n_e) por m^3, durante a trajetória de propagação do sinal. Assim, considerando apenas os efeitos de primeira ordem, pode-se expressar que:

$$n_f = 1 + \frac{C_2}{f^2} \tag{11}$$

A partir da equação (11) é possível obter o índice de refração da velocidade de grupo, onde

$$n_g = -2 \frac{C_2}{f^3} df \tag{12}$$

Logo:

$$n_g = -1 - \frac{C_2}{f^2} \tag{13}$$

É possível observar que o índice de refração da fase e do grupo se diferenciam apenas pelo sinal do coeficiente C_2, que é dado por (HARTMANN e LETINGER, 1984):

$$n_g = -1 - \frac{C_2}{f^2} \tag{14}$$

$$C_2 = -40{,}3\, n_e \tag{15}$$

De acordo com SI (Sistema Internacional de medidas), 40,3 é uma constante dada em mHz^2 (el/m^2) e n_e em el/m^3.

Portanto, tem-se que:

$$n_f = 1 - \frac{40{,}3\ n_e}{f^2} \tag{16}$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40{,}3\ n_e}{f^2} \tag{17}$$

Assim, provoca um aumento nas distancias que se obtém a partir do código e uma diminuição nas distâncias obtidas por meio da fase.

Desprezando- se os erros sistemáticos encontrados na distância (S) entre o satélite (s) e o receptor (r), tem-se que:

$$S = \int_r^s n\,ds \tag{18}$$

sendo n, de modo genérico, o índice de refração da fase ou do grupo. A distância medida entre o satélite e a antena receptora é influenciada pelo índice de refração, e a integral é dada ao longo do caminho percorrido pelo sinal. A distância geométrica (ρ) entre o satélite e o receptor é obtido quando o índice de refração é unitário, sendo assim:

$$\rho = \int_r^s ds \tag{19}$$

A diferença entre a distância medida (S) e a geométrica (ρ) é chamada de refração ionosférica (I_r^s) e representa o erro sistemático, dado por:

$$I_r^s = \int_r^s n\,ds - \int_r^s ds \tag{20}$$

Substituindo os índices de refração da fase (16) e do grupo (17), é possível obter os erros sistemáticos causados pela ionosfera para a fase do batimento da onda portadora, dado por:

$$I_{f_r}{}^s = \int_r^s \left(1 - \frac{40{,}3 n_e}{f^2}\right) ds - \rho \tag{21}$$

ou

$$I_{f_r}{}^s = -\frac{40{,}3}{f^2} \int_r^s (n_e)\,ds \tag{22}$$

e pode-se obter para os sinais modulados pelo código:

$$I_{g_r}{}^{s} = \int_r^s (1 + \frac{40{,}3 n_e}{f^2})\, ds - \rho \tag{23}$$

ou ainda,

$$I_{g_r}{}^{s} = \frac{40{,}3}{f^2} \int_r^s n_e\, ds \tag{24}$$

sendo $\int_r^s n_e\, ds$ a parte variável que caracteriza a densidade de elétrons ao longo do caminho do sinal entre o satélite e o receptor, que por sua vez representa o TEC (el/m²):

$$TEC = \int_r^s n_e\, ds \tag{25}$$

Substituindo a equação (22) nas equações (21) e (19), temos que:

$$I_{f_r}{}^{s} = -\frac{40{,}3}{f^2} TEC \tag{26}$$

e

$$I_{g_r}{}^{s} = \frac{40{,}3}{f^2} TEC \tag{27}$$

O TEC ainda pode ser obtido pela combinação da fase e da pseudodistância, provindas de receptores de dupla frequência, desde que sejam afetadas pela mesma densidade eletrônica, como é apresentado na equação (28):

$$TEC = \frac{f_1^2 f_2^2}{40{,}3(f_1^2 - f_2^2)} [PD_{1r}^s - PD_{2r}^s - \varepsilon] \tag{28}$$

A refração ionosférica relacionada com o código é chamada de atraso ionosférico. É possível notar que a refração ionosférica, seja ela para a fase da onda portadora ou para o os sinais modulados pelo código são inversamente proporcionais ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao código. Assim, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera.

Devido à aproximação na obtenção do índice de refração, a correção do erro sistemático causado pela ionosfera representa apenas o efeito de primeira ordem, o qual pode ser modelado por receptores de dupla frequência. O erro remanescente representa poucos centímetros (SEEBER, 1993). A Tabela 2 apresenta o erro máximo, na direção vertical, o que pode ser esperado para as portadoras L_1 e L_2 e para a combinação linear livre da ionosfera (L_0).

Tabela 3 - Máximo erro vertical devido à ionosfera

Frequência	Efeitos de 1ª ordem	Efeitos de 2ª ordem	Efeitos de 3ª ordem
L_1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L_2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L_0	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: Seeber (1993)

Em direções inclinadas não se pode considerar o mesmo, pois a influência aumenta (SEEBER, 1993).

4.2. Cintilação ionosférica

O efeito de uma rápida variação na densidade do plasma ionosférico causa também variações no ângulo de fase e/ou amplitude, polarização e ângulo de propagação de um sinal de rádio que a atravessa. Devido a essa rápida variação no sinal, pode ocorrer uma degradação a acurácia das medidas da fase da pseudodistância nos receptores GNSS, sendo diretamente refletida nas coordenadas estimadas e na capacidade do receptor de coletar dados corretamente e manter sintonia dos satélites observados (CONKER *et al*, 2002).

Um sinal de rádio que atravessa a ionosfera será modificado por irregularidades de poucos metros até quilômetros, podendo tornar inviável o rastreamento do sinal. Os efeitos de cintilação já foram observados em sinais que variam de 20 MHz até 10 GHz, sendo mais comum em sinais de até 3 GHz (DAVIES, 1990).

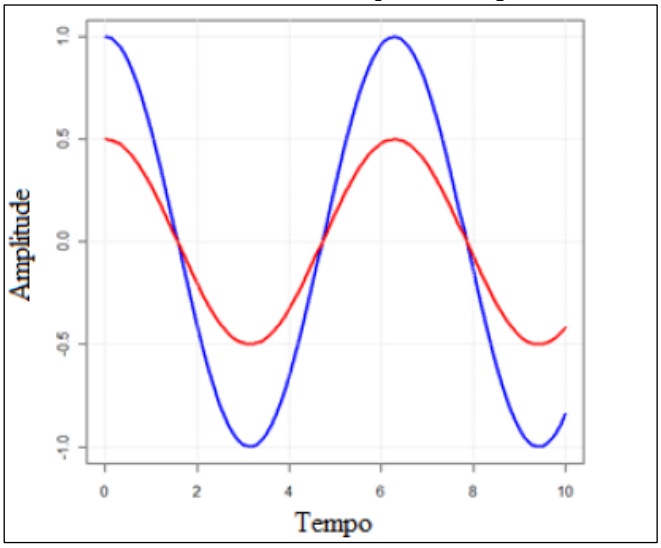
Devido a ionosfera ser um meio dispersivo, quanto maior a frequência, menor o efeito na ionosfera considerando a refração dos sinais. Porém, mesmo na maior frequência utilizada pelos sistemas de posicionamento por satélites, as variações de fase e amplitude são importantes para o cálculo de coordenadas, podendo provocar perdas de ciclo nas frequências, em um curto intervalo de tempo. Além disso, sabe-se que diferentemente do erro provocado pela refração, a cintilação ionosférica não pode ser corrigida diretamente pela combinação entre duas frequências, por ser um evento quase aleatório (STRANGEWAYS, 2008).

Nos próximos itens serão apresentadas as principais características nos sinais GNSS, como cintilação em amplitude e na fase e os aspectos presentes na cintilação da região equatorial.

4.2.1. Cintilação de amplitude

Uma característica dos sinais utilizados no posicionamento GNSS e que acabam por não comparecer nas equações das observáveis GNSS é a amplitude da onda, ou potência do sinal. Existem várias definições para a amplitude de uma onda, porém sempre se utilizam os termos “potência máxima” ($P_{máx}$) e “potência mínima” (P_{min}) de um sinal em um tempo definido. A Figura 10 exemplifica sinais com a mesma frequência e potencias diferentes (MENDONÇA, 2013).

Figura 10 - Sinais com a mesma frequência e potências diferentes



Fonte: Mendonça (2013)

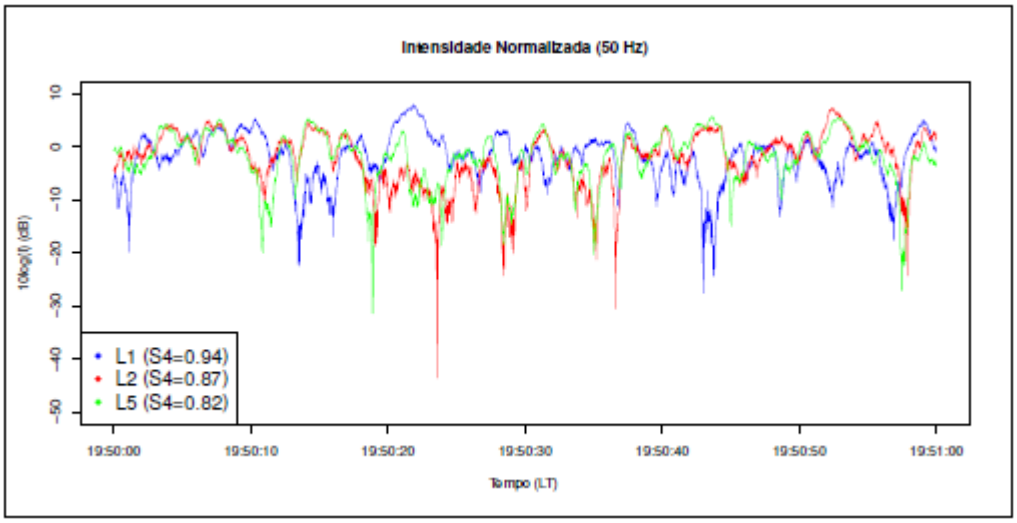
A potência do sinal pode ser entendida como uma padronização de quanta energia é recebida em certa área, sendo a unidade de medida mais comum para o caso de ondas de rádio o W/m² (McNAMARA, 1991). Pode-se também definir a intensidade do sinal como sendo função da potência. Essa função é apresentada na equação (29).

$$I = 10 \log P \tag{29}$$

onde P é a potência do sinal em determinado momento. A unidade de medida utilizada, nessa escala logarítmica, é o decibel (dB).

De acordo com Kinter (2007), a intensidade do sinal GNSS recebido possui correlação com a variação de TEC quando ocorre cintilação. A Figura 11 traz a variabilidade da potência do sinal sob efeito de cintilação para diferentes bandas.

Figura 11 - Intensidade do sinal sob influência da cintilação



Fonte: Vani (2018)

A partir destes conceitos, tem-se os índices S que caracterizam a variação da potência de um sinal ao longo do tempo. A amplitude de uma onda pode ser dividida em harmônicos, sendo o quarto índice (S_4) o mais utilizado entre eles. O índice S_4 é dado pela dispersão da intensidade do sinal ao longo do tempo, dividido pela média dessa intensidade como pode ser visto equação (30).

$$S_4 = \sqrt{\frac{<I^2> - <I>^2}{<I>^2}} \tag{30}$$

onde I um vetor que contem a intensidade do sinal em um determinado intervalo de tempo e <> corresponde um operador de média.

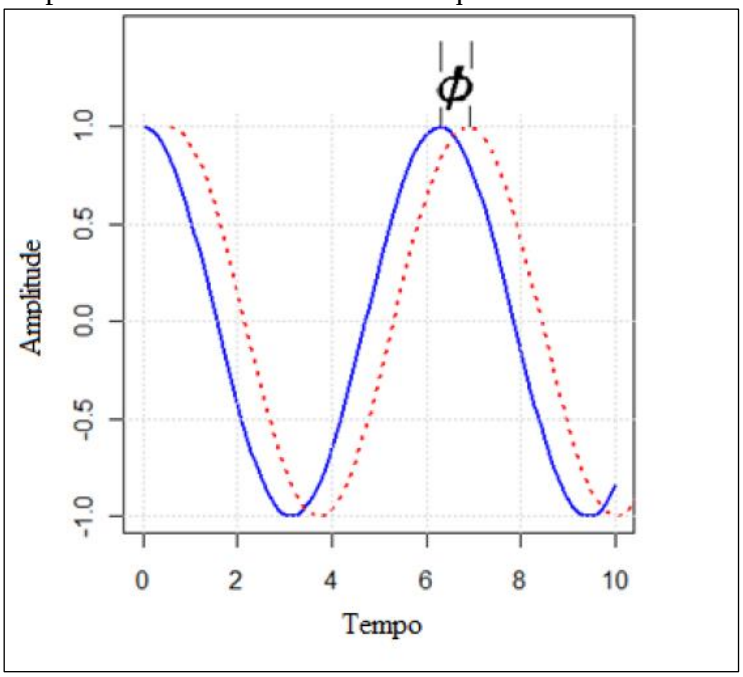
Muitos autores apresentam quais os possíveis limiares que definem o índice S_4 e relacionam este com eventos de cintilação ionosférica fraco, médio, moderado ou forte. Segundo Muella et. al (2009), os níveis podem classificados como:

- Cintilação fraca: $0{,}2 < S_4 \leq 0{,}4$;
- Cintilação moderada: $0{,}4 < S_4 \leq 0{,}6$;
- Cintilação forte: $0{,}6 < S_4 \leq 1{,}0$;
- Cintilação saturada: $1{,}0 < S_4 \leq 1{,}4$.

4.2.2. Cintilação em fase

A partir das medidas da fase da onda portadora, é possível descobrir em que ponto do período o sinal se encontra e assim iniciar a contagem de ciclos de acordo com o movimento do satélite que emite o sinal. A Figura 12 apresenta um exemplo de dois sinais com mesma frequência, sendo um como referência (azul) e o outro como um sinal recebido com atraso.

Figura 12 - Exemplo de dois sinais de mesma frequência e a medida de fase entre eles



Fonte: Mendonça (2013)

Segundo Davies (1990), a medida da cintilação de fase pode ser dada pelo desvio padrão da fase filtrada em determinado intervalo de tempo. A fase é filtrada para que as tendências (*dentreded phase*) sejam removidas e para a identificação da cintilação. Tipicamente, esse processo de um filtro de Butterworth de 6ª ordem, aplicando uma frequência de corte de 0,1 Hz (DIERENDONCK; KLOBUCHAR; HUA, 1993). Assim, o efeito da geometria orbital do satélite e o erro do relógio do receptor ao longo do tempo são eliminados.

Para mensurar a cintilação em fase, comumente é utilizado o índice Sigma - Phi (σ_φ), sendo mais utilizado o intervalo de 60 segundos (σ_φ), ou seja, é calculado o desvio padrão das medidas de fase nos últimos sessenta minutos, como mostra a equação (31):

$$\sigma_\varphi = <\varphi^2> - <\varphi>^2 \quad (31)$$

onde φ é o vetor das fases medidas.

A variação de fase do sinal segue uma distribuição normal com média zero ao longo do tempo, sendo interessante para as analises, apenas o desvio padrão dessa variação. Nas regiões equatoriais, estudos indicam que os índices S_4 e σ_φ possuem forte correlação entre si. Para a classificação Hegarty et al. (2001) apresenta o seguinte padrão:

- Cintilação muito fraca: 0,05 rad < $\sigma_\varphi \leq$ 0,2 rad;
- Cintilação fraca: 0,2 rad < $\sigma_\Phi \leq$ 0,3 rad;
- Cintilação moderada: 0,3 rad < $\sigma_\Phi \leq$ 0,6 rad; e σ_φ

- Cintilação forte: $\sigma_\Phi > 0,6$ rad.

Ou ainda em graus (°):

- Cintilação muito fraca: $2,9° < \sigma_\Phi \leq 11,5°$;
- Cintilação fraca: $11,5° < \sigma_\Phi \leq 17,2°$;
- Cintilação moderada: $17,2° < \sigma_\Phi \leq 34,4°$ e
- Cintilação forte: $\sigma_\Phi > 34,4°$.

5. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho se utilizou dados de redes com receptores próprios para a coleta dos índices de cintilação ionosférica. Os estudos foram embasados na análise do comportamento da cintilação ionosférica, via os parâmetros S_4 que quantifica a amplitude da cintilação e, o índice σ_ϕ que quantifica a cintilação pelo desvio-padrão da fase. Neste capítulo serão apresentados os dados utilizados, métodos e algumas análises preliminares realizadas.

5.1. Dados

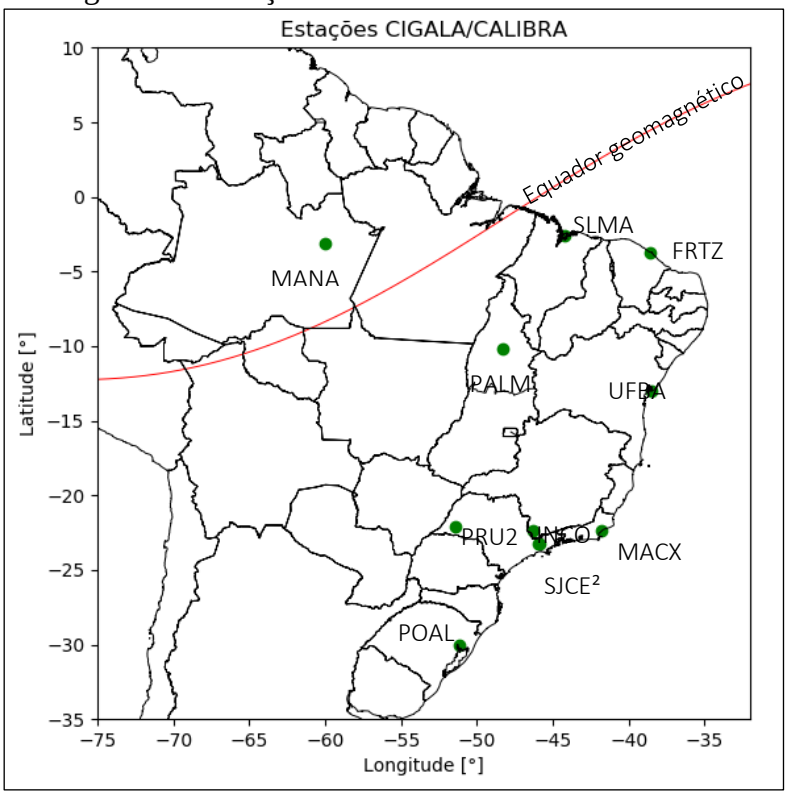
Os dados utilizados para a análise da cintilação ionosférica, foram obtidos por meio de receptores apropriados para monitoramento da ionosfera, por meio da rede CIGALA/CALIBRA, hoje GNSS NavAer. O período analisado foi de março/2011 até dezembro/2018, para cintilação em amplitude e em fase. É importante ressaltar que este período contempla dados de máxima atividade solar e de mínima atividade, o que interfere diretamente na ionosfera, envolvendo o ciclo solar 24.

Assim como o período, a localização das estações também é um fator importante para a análise. Por isso, para estes experimentos foram utilizados dados de 13 estações localizadas no Brasil. Na Tabela 4 são apresentadas as coordenadas das estações em utilizando-se do sistema de referência geodésico SIRGAS2000 . A Figura 13 representa graficamente as mesmas estações disponíveis para análise, bem como sua localização em relação ao equador geomagnético.

Tabela 4 - Coordenadas das estações

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
SLMA	02°35’36.47" S	44°12’44.24" W
FRTZ	03°44’40.39" S	38°34’39.48" W
UFBA	12°59’59.37" S	38°30’38.37" W
SJCU	23°12’38.12" S	45°57’23.73" W
MANA	03°7’11.37" S	60°00’25.80" W
PALM	10°11’58.73" S	48°18’40.67" W
PRU2	22°07’19.33" S	51°24’25.48" W
INCO	22°19’6.77" S	46°19’41.20" W
MAC3	22°24’4.18" S	41°48’29.44" W
MACA	22°24’53.77" S	41°51’43.61" W
MAC2	22°22’36.53" S	41°47’28.98" W
POAL	30°04’26.02" S	51°07’10.86" W
SJCE	23°12’27.10" S	45°51’35.07" W

Figura 13 - Estações CIGALA/CALIBRA utilizadas



O tempo de início e final de coleta de cada estação também foi variável durante o período utilizado na pesquisa. Na Tabela 5 é apresentada a data de início de coleta, a partir de 01/03/2011 e a data da última coleta dentro do período estudado. As estações MACA, MAC2 e MAC3 é apresentada pela estação MACX, devido à proximidade da localização. Pode-se observar que enquanto a estação localizada em Presidente Prudente (PRU2) coletou dados durante todo o período, a estação localizada em Manaus (MANA) coletou apenas em um ano e meio.

Tabela 5 - Data de início e data final de coleta de cada estação durante o período estudado

Estação	Data de início da coleta	Data da última coleta
SLMA	12/08/2014	31/12/2018
FRTZ	24/10/2013	31/12/2018
UFBA	08/11/2013	31/12/2018
SJCU	20/05/2011	31/12/2018
MANA	17/06/2011	28/10/2012
PALM	05/04/2011	31/12/2018
PRU2	01/03/2011	31/12/2018
INCO	01/11//2013	31/12/2018
MAC3	18/05/2011	31/12/2018
POAL	04/07/2011	31/12/2018
SJCE	12/12/2012	31/12/2018

Já na Tabela 6 é mostrada a quantidade de dados total disponível para análise, que corresponde ao número de linhas do banco de dados com registro de pelo menos uma observação, o valor absoluto e em porcentagem para cada observação específica, considerando todo o período considerado (2011 a 2018), bem como as estações. Foram considerados os dois índices (S_4 e σ_φ) e as três frequências utilizadas nas análises.

Tabela 6- Porcentagem de dados disponíveis para cada estação, considerando como total o período de março/2011 a dezembro/2018

Estação	S_4 em L1	S_4 em L2	S_4 em L5	σ_φ em L1	σ_φ em L2	σ_φ em L5
MACA	4,00%	4,00%	0,00%	3,73%	3,73%	0,00%
MANA	10,02%	10,01%	3,37%	9,86%	9,86%	3,31%
PALM	61,75%	61,75%	37,84%	59,91%	59,91%	37,78%
POAL	88,82%	88,85%	61,76%	87,22%	87,27%	61,68%
PRU2	99,07%	99,03%	73,89%	98,95%	98,91%	73,73%
SJCU	91,32%	91,55%	52,63%	90,75%	91,00%	52,04%
MAC2	25,89%	25,89%	0,13%	19,34%	19,34%	0,12%
SJCE	73,69%	73,35%	64,25%	65,21%	64,88%	56,43%
INCO	99,07%	96,28%	57,18%	62,39%	62,39%	58,80%
FRTZ	59,21%	59,21%	55,82%	59,20%	59,20%	55,78%
UFBA	34,03%	34,03%	31,25%	34,02%	34,02%	30,99%
SLMA	31,48%	31,48%	31,17%	31,45%	31,45%	31,14%
MAC3	39,12%	38,02%	3,52%	36,44%	36,31%	3,50%

Quando se trata dos efeitos causados pela ionosfera, existe ainda o multicaminho, que pode ser computado erroneamente como erro ionosférico. Para minimizar o efeito do multicaminho, Spogli et. al (2013) utiliza apenas satélites cujo o ângulo de elevação é maior que 20°. Já em Sahiti et. al (2018) os dados de cintilação ionosférica utilizados na análise são aqueles com ângulo de elevação maiores que 30°. Sreeja e Aquino (2014) utilizam ângulo de elevação maior que 15°. Segundo um estudo realizado por Mendonça (2013), grande parte das estações da rede CIGALA/CALIBRA apresentaram resultados livre da influência de multicaminho utilizando uma máscara de elevação de 25° ou menores. Portanto utilizou-se dados com ângulo de elevação maior que 25° para estudos da ionosfera.

5.2. Métodos

Para análise da ocorrência da cintilação ionosférica, utilizou dois métodos: *GBSC- Ground-Based Scintilation Climatology* (ALFONSI et. al, 2011) e a CCDF (*Complementary Curve Distribution Function).*

5.2.1. GBSC- *Ground-Based Scintilation Climatology*

A *GBSC- Ground-Based Scintilation Climatology* (ALFONSI et. al, 2011) é uma técnica é baseada na porcentagem de ocorrência do fenômeno (O), maior ou menor, que determinado limiar (equação 32):

$$O = \frac{N_{limiar}}{N_{total}} \tag{32}$$

Como limiar, utilizou-se os limiares definidos por Muella et al (2009) para classificar a cintilação em amplitude, já para a cintilação em fase foi definido como os limiares aqueles definidos por Hegarty et al. (2001).

5.2.2. CCDF - *Complementary Curve Distribution Function*

A curva CCDF é uma grande aliada dos estudos de sistemas de comunicações, pois ela permite a visualização do comportamento e responde uma pergunta importante: com que frequência a variável aleatória assume valor maior que determinado nível? Para encontrarmos a resposta basta obter o valor da função de distribuição acumulada (CDF). Sendo assim temos:

$$CCDF = 1 - CDF \tag{33}$$

onde,

$$CDF = F_x(x_i) = P(x \leq x_i) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i) \tag{33}$$

Utilizando estes métodos, foi possível analisar o comportamento da cintilação tanto em fase como em amplitude.

5.3. Análises preliminares

Utilizou-se das análises preliminares para a identificação e exclusão de *outliers*, para que as os resultados não estivessem enviesados por conta de problemas relacionados as trocas de *firmwares* ou até mesmo atualização dos receptores. Para encontrar estes *outliers* realizou-se a comparação dos resultados encontrados a partir do método GBSC com a literatura e com a ferramenta ISMR Query Tools. A Figura 14 e Figura 15 mostra o resultado do método GBSC com os limiares de Muela (2009), da estação SJCU e

MAC3, respectivamente, utilizando a frequência L1 para a cintilação em amplitude. No eixo X é apresentado os meses e anos e no eixo Y é apresentada a respectiva porcentagem de ocorrência.

Figura 14 - Identificação de *outliers* utilizando a técnica GBSC - Estação SJCU

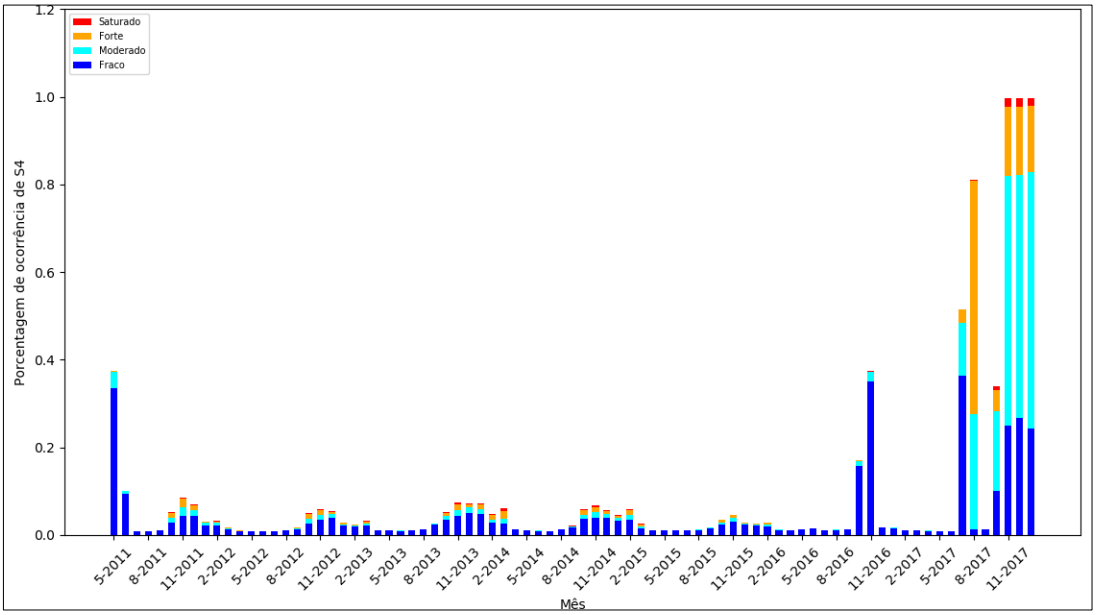
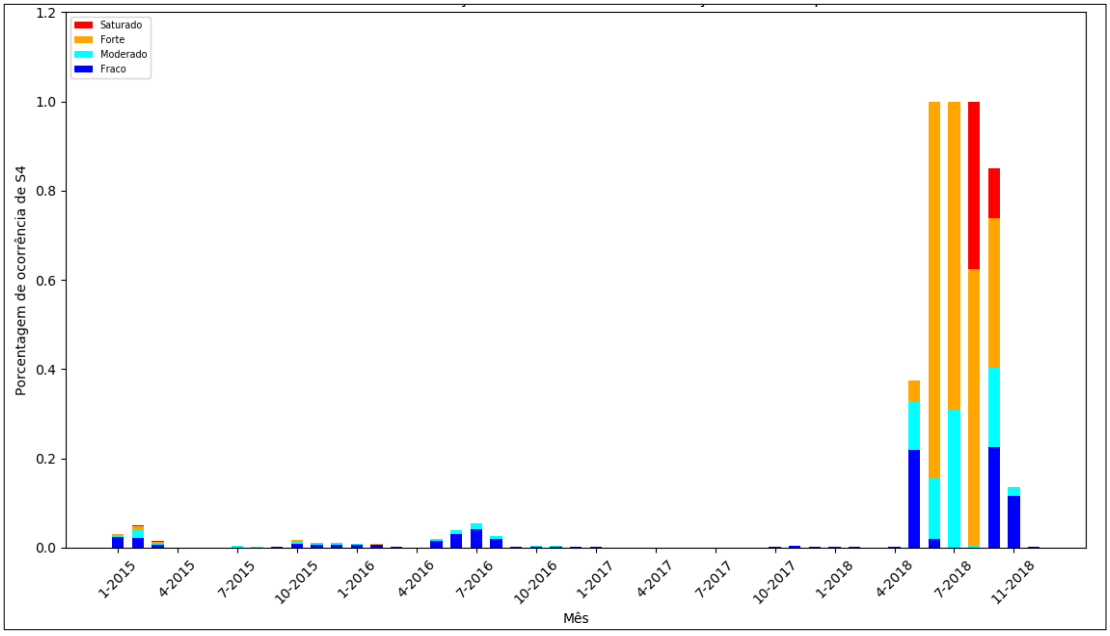


Figura 15 - Identificação de *outliers* utilizando a técnica GBSC - Estação MAC3



É possível observar nas Figura 14 e Figura 15 que os resultados de porcentagem de ocorrência se encontram em níveis completamente discrepantes do restante do período,

isto é, enquanto os períodos sem outliers não chegaram a 20% de ocorrência, os períodos com outliers, em alguns casos, chegaram a 100% de ocorrência de cintilação.

Para a estação SJCU os dois primeiros meses de coleta (maio e junho de 2011), os meses de setembro e outubro de 2016 e em 2017 a ocorrência de cintilação amplitude chegou próximo a 50% e em graus moderados e fortes maiores que fraco. Já para a estação MAC3 há muita cintilação saturada ocorrendo a partir de março de 2018, e com ocorrência de cintilação em amplitude, de aproximadamente 100%. Além de comparar com o comportamento nos demais meses dentro do período analisado, podemos recorrer a literatura e observar que os anos de 2011, 2016 e 2018 não são anos de máximos solares, sendo assim a ocorrência de cintilação deveria ser menor que no ano de 2013 e 2014, que são anos de máximo solar por exemplo. Outro método que utilizamos para a identificação dos *outliers* se deu por meio da ferramenta ISMR Query Tool. A Figura 16 e a Figura 17 apresentam os resultados obtidos pelo uso da ferramenta para as estações SJCU e MAC3.

Figura 16 - Identificação de *outliers* utilizando a ferramenta ISMR Query Tools- Estação SJCU

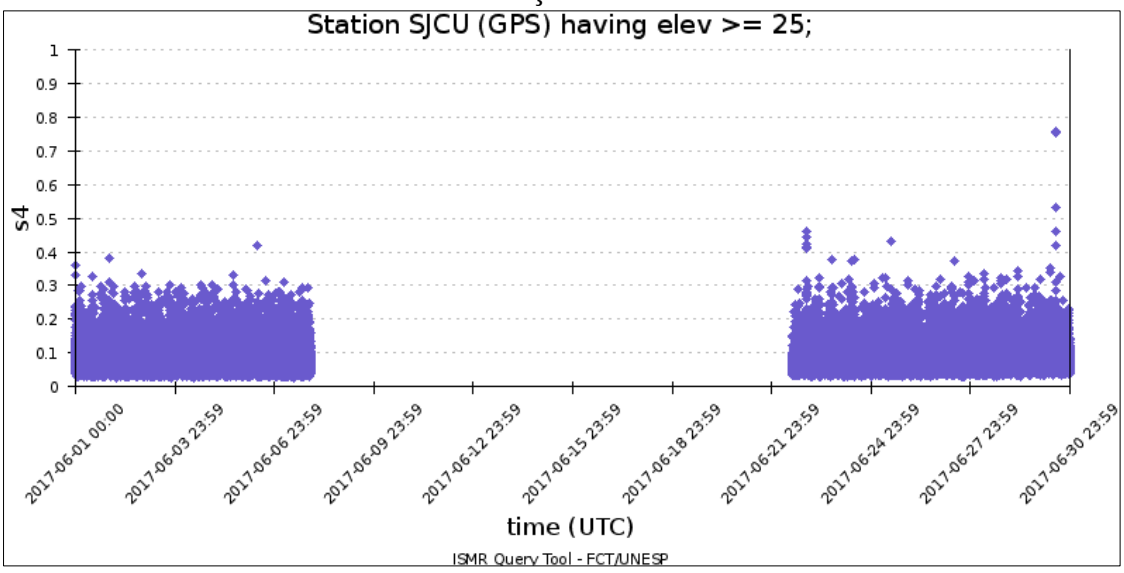
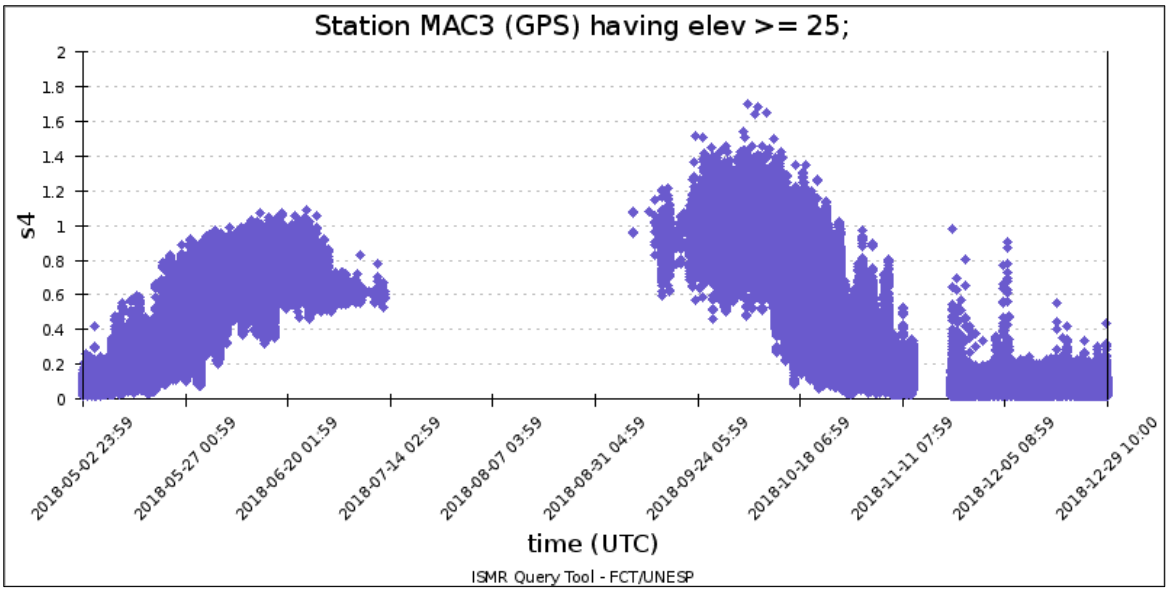


Figura 17- Identificação de *outliers* utilizando a ferramenta ISMR Query Tools- Estação MAC3

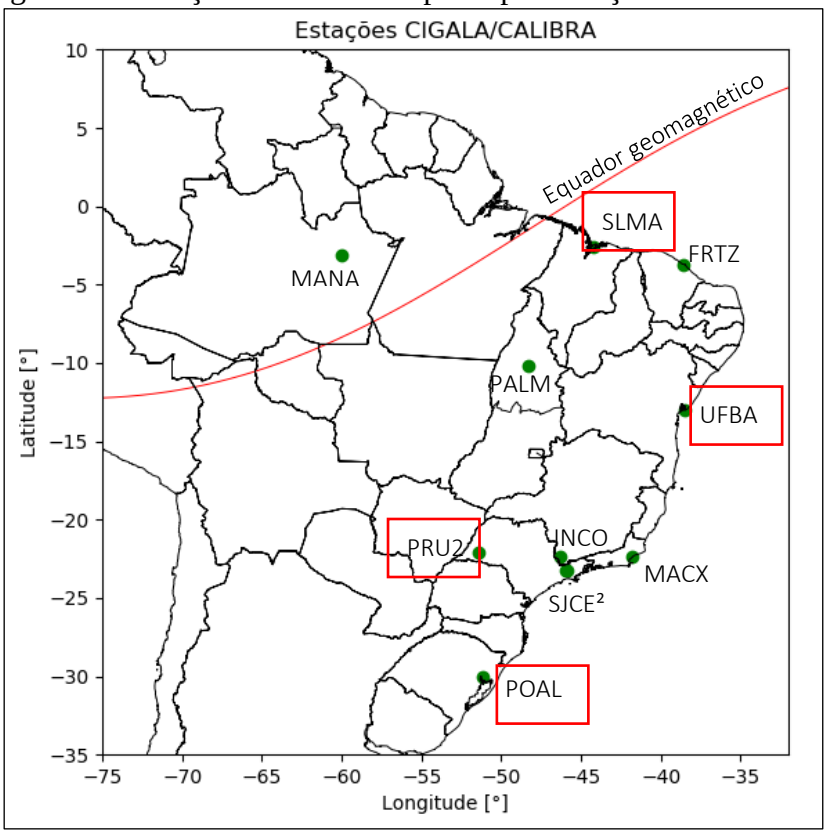


A partir da Figura 16 que apresenta os dados para a estação SJCU, pode-se observar que ocorre muita cintilação nos níveis fraco e moderado; após há falta de dados, e posteriormente retorna a coletar os dados, dando indícios de que pudesse ter algum problema no receptor desta estação. Para a estação MAC3 (Figura 17) pode-se observar que a estação apresenta aumento sem justificativa, posteriormente ocorre falha na coleta de dados e em seguida tem-se um declínio dos valores de S_4, endossando o fato de que apresentaram problemas que não podem ser classificados como cintilação ionosférica. Para as demais estações, aplicou-se a mesma metodologia para a retirada de *outliers*.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Para melhor organizar o trabalho a seção está dividida em subtópicos que estão de acordo com os experimentos realizados. Devido ao relativo alto número de estações a serem analisadas neste trabalho e considerando as similaridades nos resultados encontrados, quatro estações foram selecionadas para terem seus resultados apresentados (Figura 18).

Figura 18 - Estações selecionadas para apresentação dos resultados

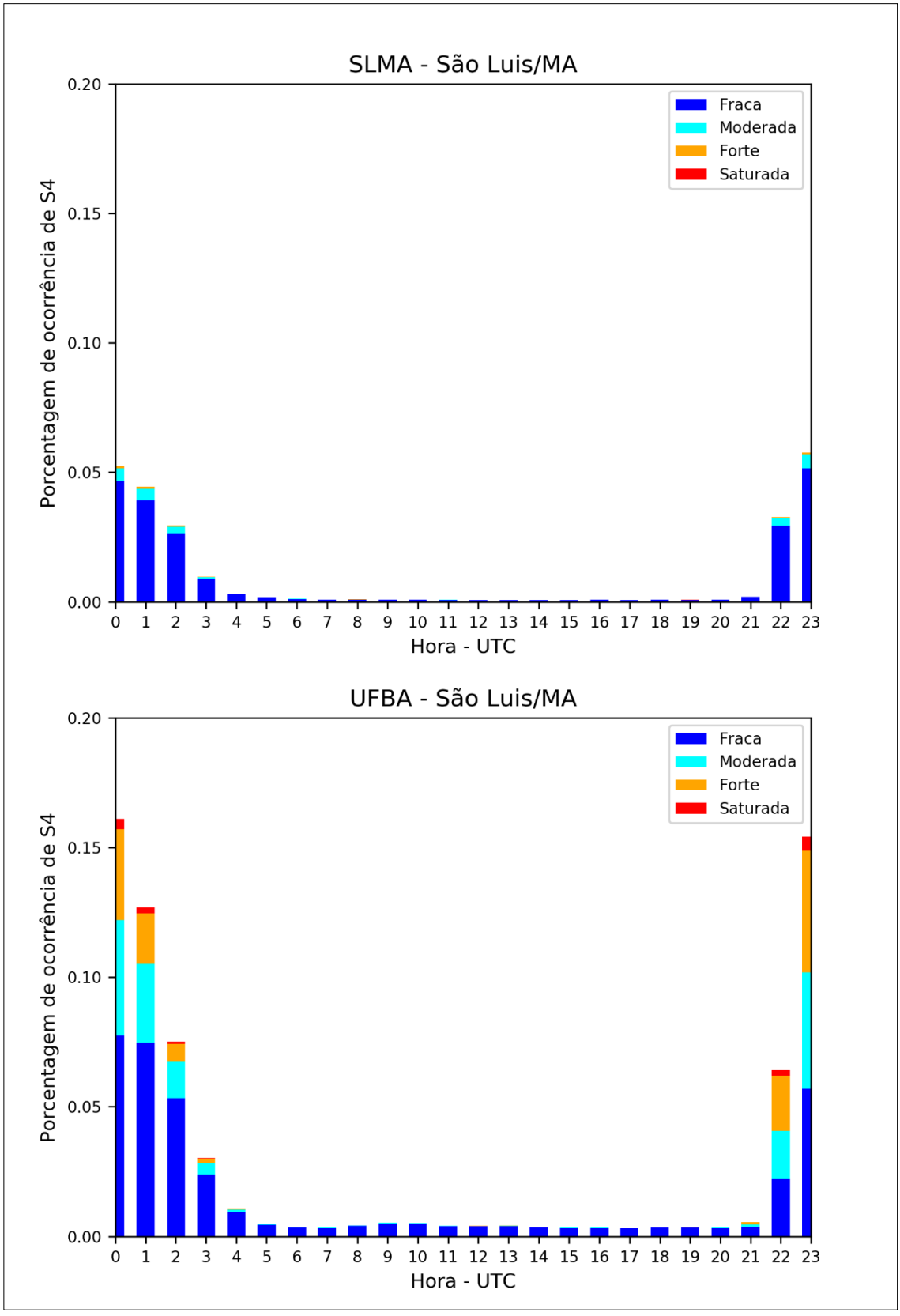


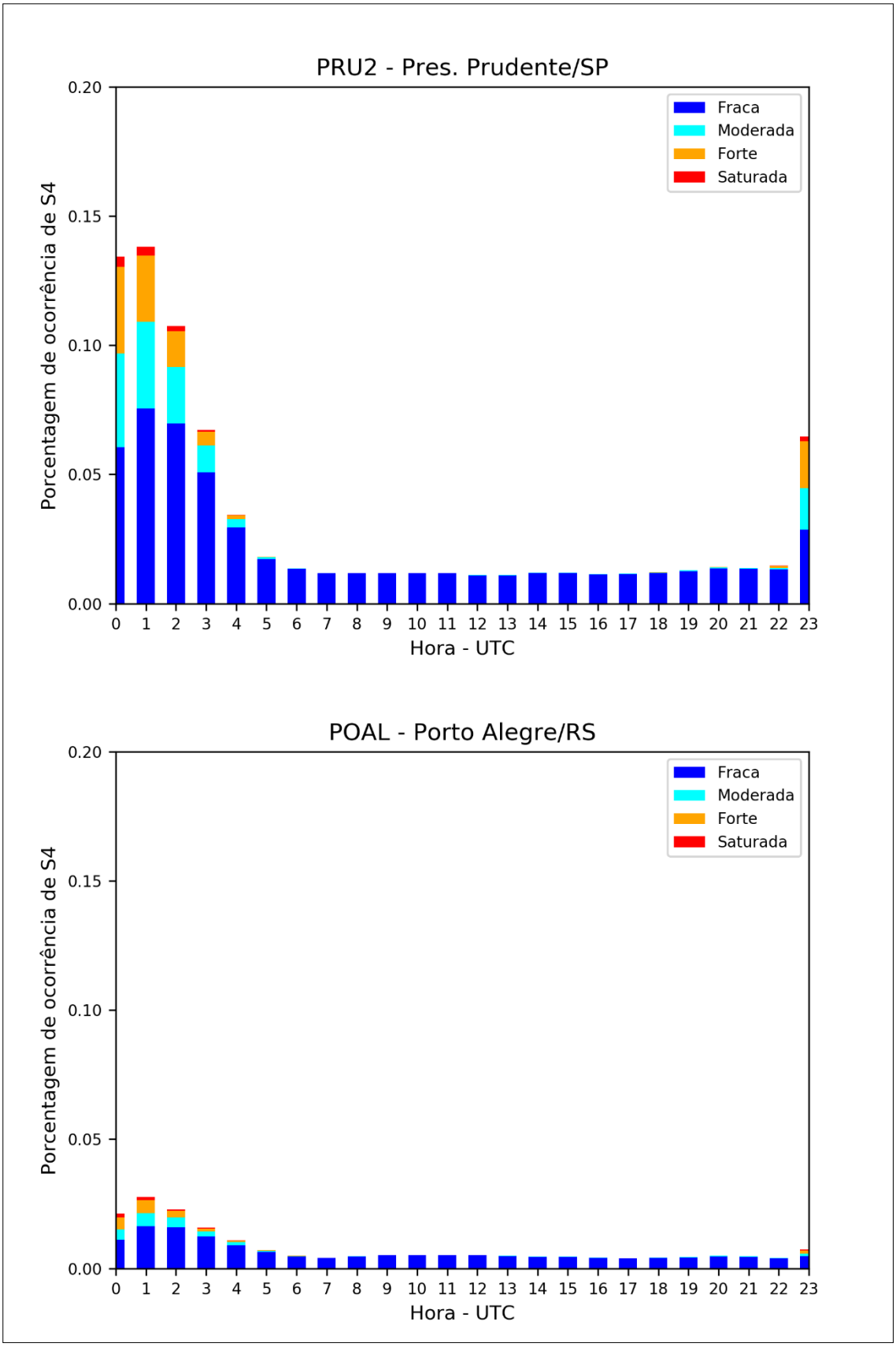
A escolha das estações se deu devido à localização geográfica e o período de operação, permitindo assim ter uma análise com maior abrangência do território brasileiro, bem como maior abrangência temporal.

6.1. Variação diurna

A partir da metodologia aplicada descrita na seção 5.2, obteve-se a porcentagem de ocorrência de cintilação ionosférica em amplitude para cada estação utilizando as três frequências (L1, L2 e L5). Para a cintilação em amplitude consideramos a classificação dada por Muella (2009). Na Figura 19 são apresentados os resultados para a cintilação em amplitude utilizando L1, onde no eixo X são representadas as horas, em UTC, de 2011 a 2018 e no eixo Y é apresentada a porcentagem de ocorrência da cintilação utilizando o índice S_4.

Figura 19 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação diurna




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Fraca
Moderada
Forte
Saturada
Porcentagem de ocorrência de S4
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Hora - UTC
POAL - Porto Alegre/RS
Fraca
Moderada
Forte
Saturada
Porcentagem de ocorrência de S4
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Hora - UTC

Ao analisar a Figura 19 pode-se notar que a estação SLMA apresentou maior ocorrência de cintilação fraca (de 0,2 a 0,4) entre as 22h e as 3h UTC, sendo que entre as 22 e as 2h UTC pode ser observado que ocorre também cintilação até 0,6, classificada como moderada por Muella (2009).

Já na estação de Salvador/BA (UFBA), é possível observar que a cintilação ocorre com maior ênfase entre as 22h e as 2h, sendo os maiores valores obtidos entre as 23h e 0h. Em se tratando da magnitude da ocorrência, nota-se que pode ocorrer cintilação saturado, com S_4 chegando a 1,4 nesse intervalo.

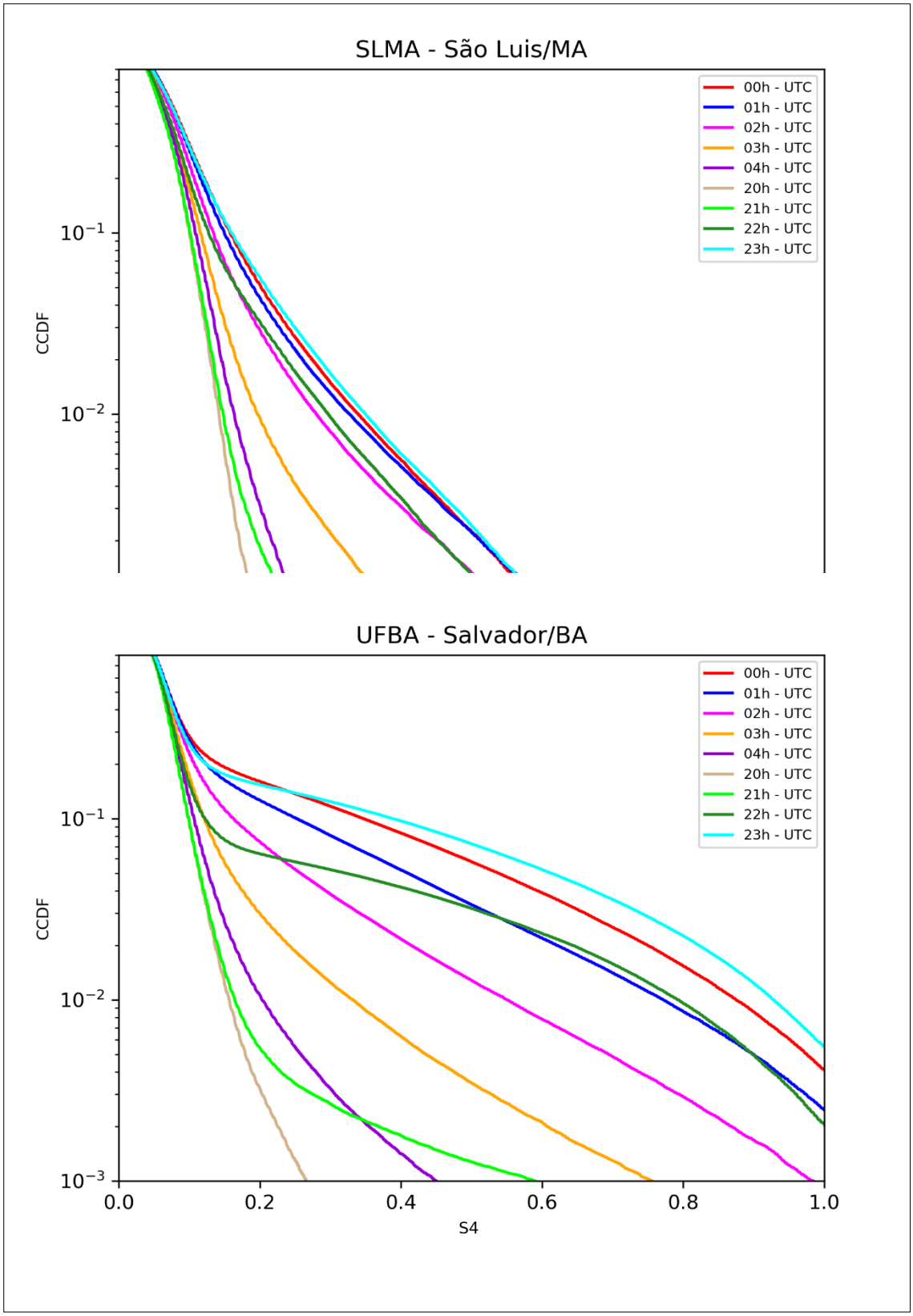
Em termos de magnitude a estação localizada em Presidente Prudente, apresenta maior ocorrência de cintilação. O período que mais ocorre cintilação está compreendido entre as 22h e as 3h, sendo que as 01h é o horário que mais ocorre cintilação de amplitude, podendo ocorrer até mesmo de modo saturado.

Na estação localizada mais ao sul do país, POAL, a ocorrência de cintilação ionosférica não chega 5% e a maior parte de sua ocorrência é fraca, sendo sua janela de maior ocorrência das 23h ás 3h, onde 1h encontra-se o maior valor de ocorrência, podendo até obter alguns valores de ocorrência saturada.

A CCDF, que mostra a probabilidade que determinado valor seja maior que um limiar, é apresentada na

Figura 20. No eixo X temos os limiares que S_4 poderá assumir ser maior, enquanto no eixo Y são apresentados os valores dessa probabilidade e as curvas são demonstradas a cada hora. Neste momento, selecionou-se o intervalo entre as 20h e as 4h, por apresentar aumento na ocorrência de cintilação, possibilitando a análise do comportamento de S_4 nos períodos críticos.

Figura 20 - CCDF - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 variação diurna



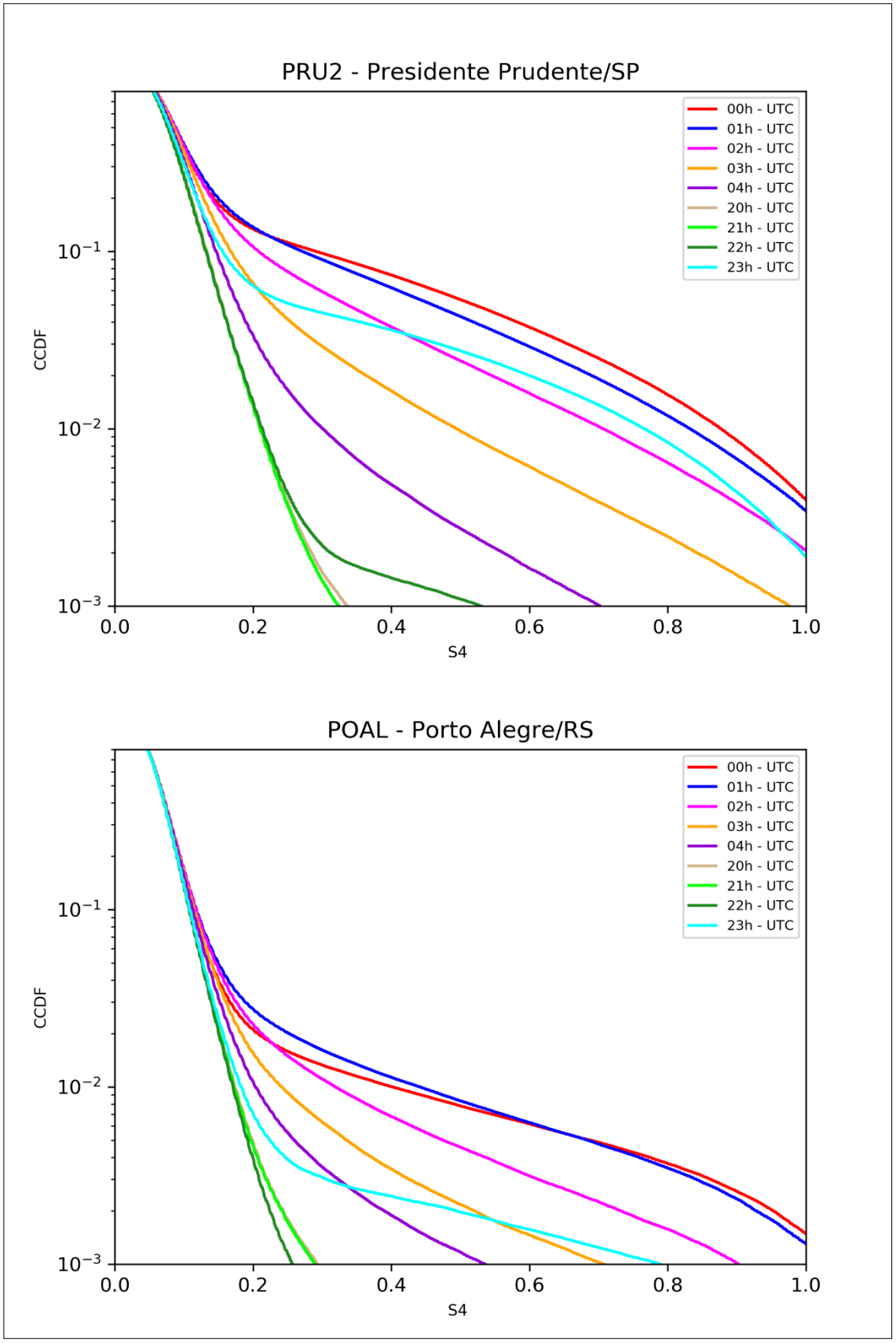

PRU2 - Presidente Prudente/SP
00h - UTC
01h - UTC
02h - UTC
03h - UTC
04h - UTC
20h - UTC
21h - UTC
22h - UTC
23h - UTC
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4
POAL - Porto Alegre/RS
00h - UTC
01h - UTC
02h - UTC
03h - UTC
04h - UTC
20h - UTC
21h - UTC
22h - UTC
23h - UTC
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4

Figura 20 é possível observar que a estação de SLMA possui pouca probabilidade que os valores sejam maiores que 0,6 mesmo quando atinge sua maior ocorrência as 23h. Entre as 23h e as 1h pode-se notar que há maior probabilidade que ocorre cintilação de maior magnitude do que no restante do período.

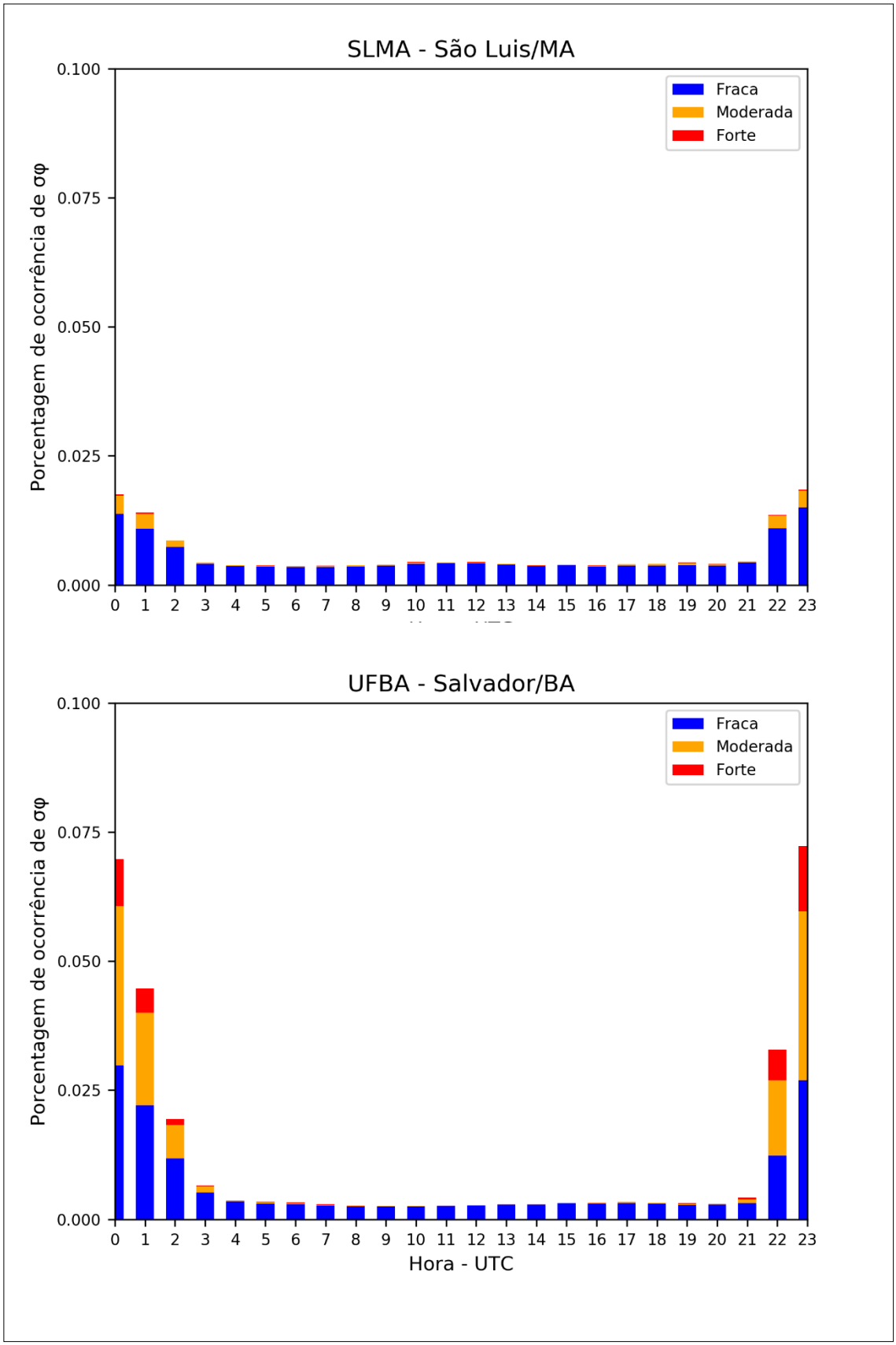
Na estação UFBA, observa-se que se tem maior probabilidade de ocorrência de cintilação em amplitude as 23h - UTC e que a cintilação neste horário pode assumir valores maiores que 1,0. Ainda pode-se observar na estação UFBA que o período com maior probabilidade de ocorrência de cintilação forte e saturada é entre as 22h e as 2h.

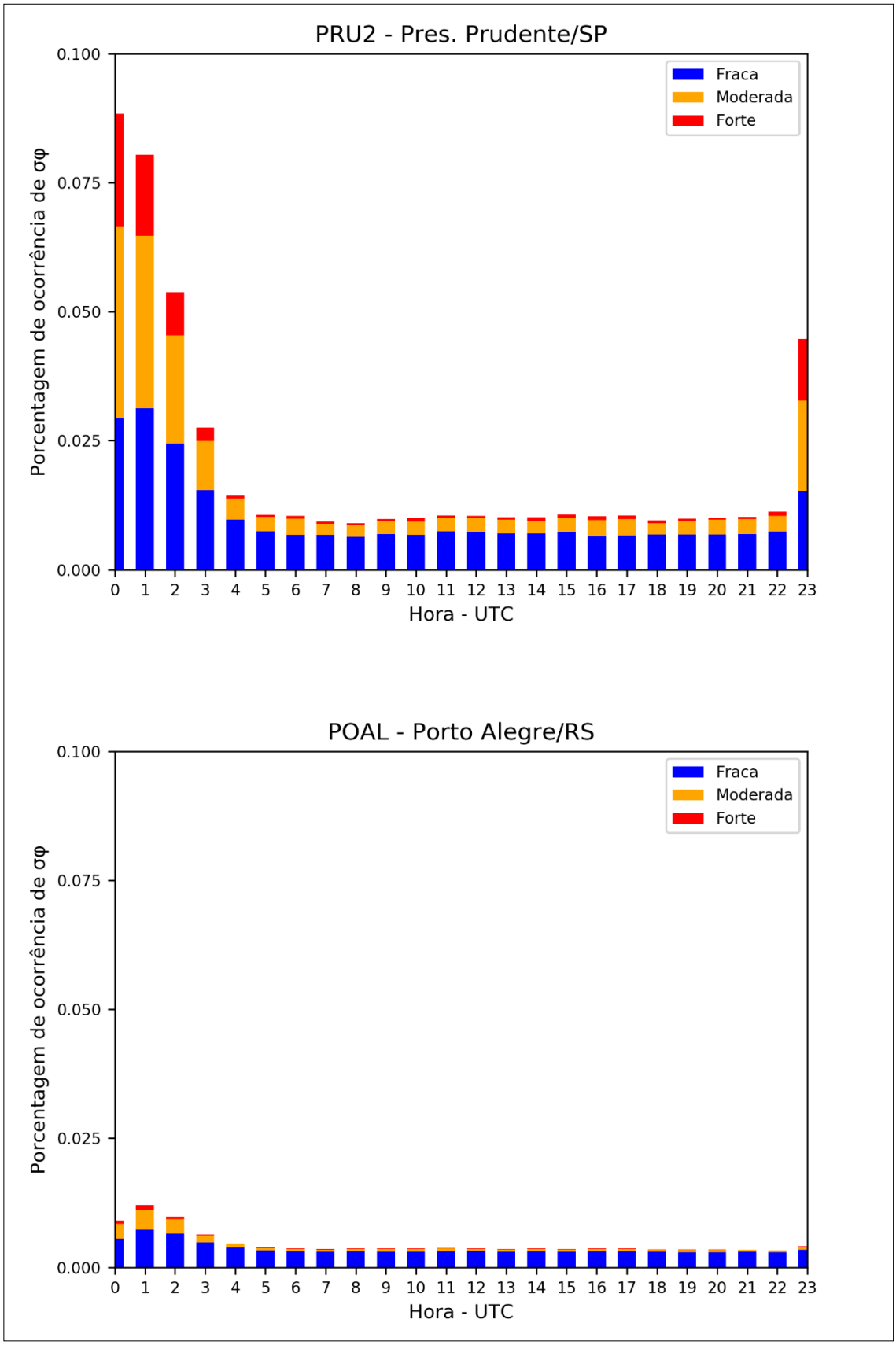
A estação PRU2 apresenta maior probabilidade de ocorrência de valores maiores que 0,8 as 0h - UTC, diferente das estações UFBA e SLMA. Observou que a estação possui probabilidade de que ocorra cintilação forte ou saturada maior que 0,6, entre as 21h e as 3h UTC, sendo que entre a 00h e as 2h a probabilidade chegue a quase 10%.

Para a estação POAL, tem-se aproximadamente 1% de ocorrência de cintilação forte e saturada entre as 0h e a 1h, sendo assim essa a janela de ocorrência mais alta da cintilação em amplitude. Já entre as 21h e as 2h os valores podem chegar a até 0,9 com probabilidade de 0,01% e a probabilidade de que ocorra valores maiores que 0,5 é menor 1%.

Para a análise da porcentagem da ocorrência da cintilação em fase, utilizou-se o índice σ_{φ}, aplicando o método GBSC. Na Figura 21 é apresentada essa porcentagem de ocorrência utilizando a frequência L1, sendo o eixo X as horas em UTC e o eixo Y a porcentagem de ocorrência, classificada de acordo com Hegarty (2001) onde é a cintilação em fase é disposta em fraca (azul), moderada (laranja) e forte (vermelho). Para estes estudos a cintilação muito fraca desconsiderada, pois impediu a análise das demais classificações.

Figura 21 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação diurna




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Fraca
Moderada
Forte
Porcentagem de ocorrência de σφ
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Hora - UTC
POAL - Porto Alegre/RS
Fraca
Moderada
Forte
Porcentagem de ocorrência de σφ
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
Hora - UTC

A partir da Figura 21 é possível observar que ocorrência de cintilação em fase na estação SLMA apresentou maior ocorrência de cintilação fraca entre as 22h e as 2h, sendo que entre as 22 e as 2h UTC pode ser observado que ocorre também cintilação moderada e forte, o que não acontece no restante do período.

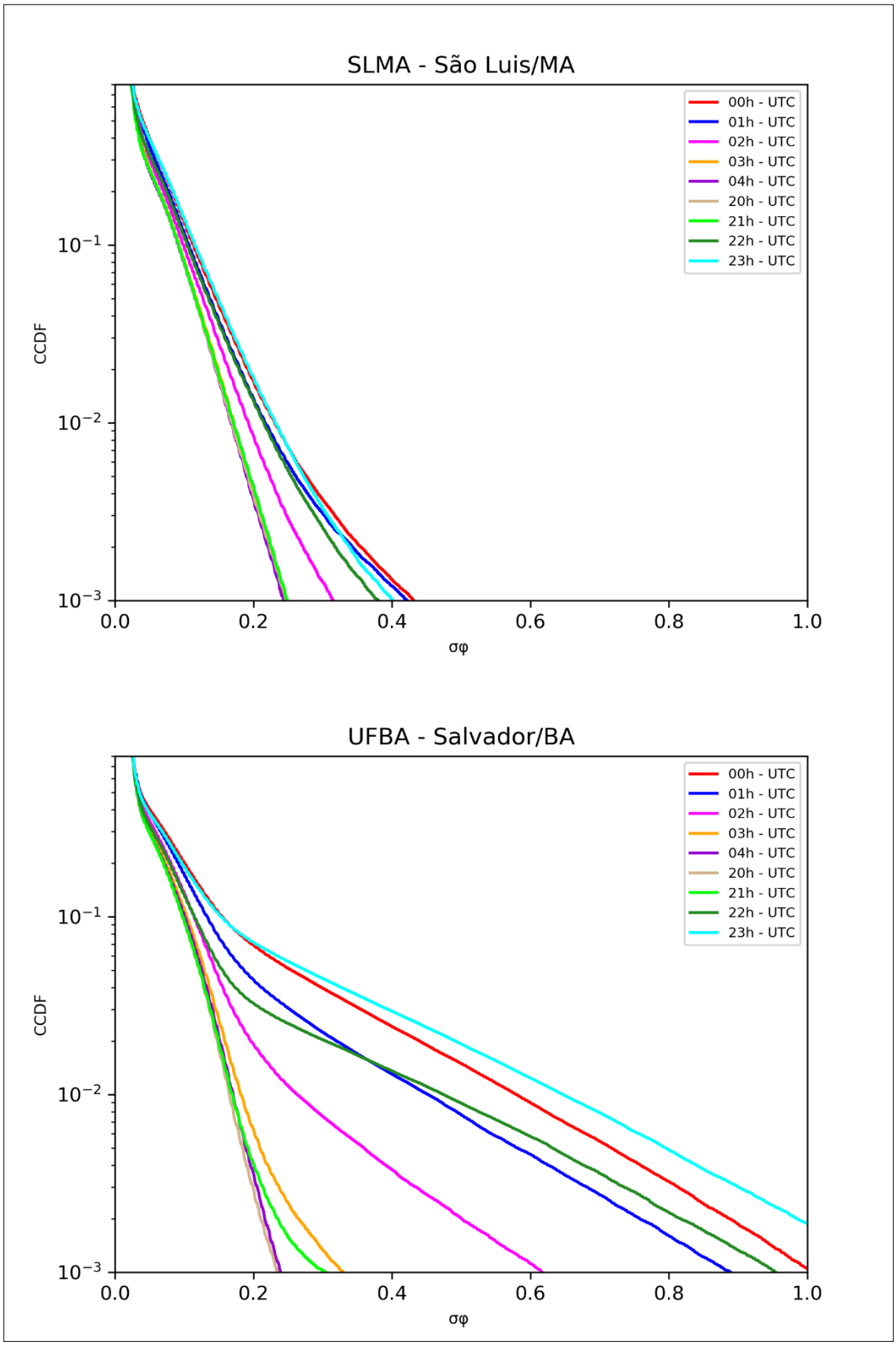
Na estação UFBA, é possível observar que a cintilação ocorre com maior ênfase entre as 22h e as 3h, sendo os maiores valores obtidos até as 2h. Se tratando da magnitude da ocorrência, nota-se que os valores podem chegar a classificação forte (> 34,4º), sendo entre as 23h e 00h seu maior pico.

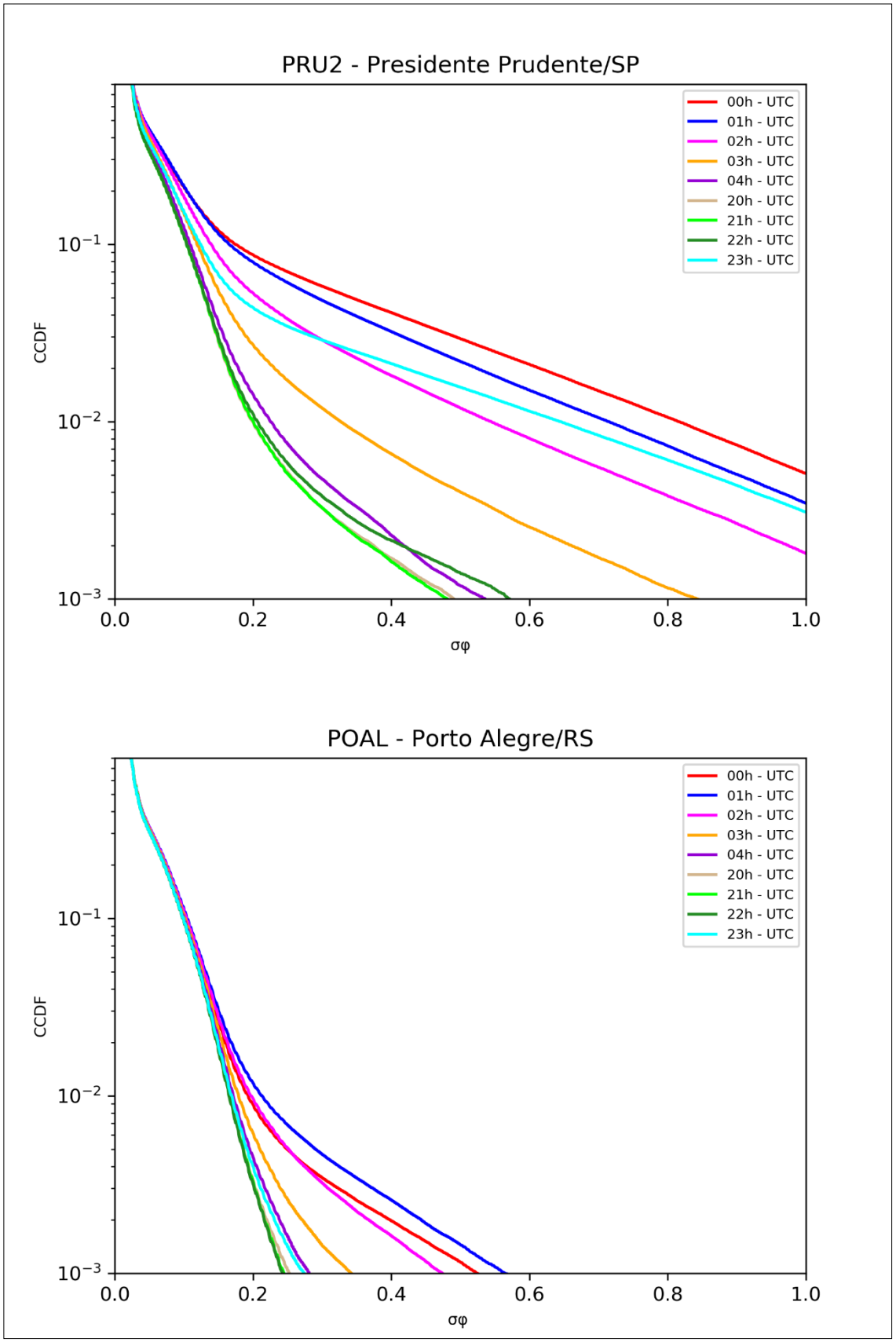
A estação PRU2 maior ocorrência de valores moderados e forte para cintilação em fase. O período que mais ocorre cintilação está compreendido entre as 23h e as 3h, sendo que as 0h é o horário que mais ocorre cintilação em fase, podendo chegar a ser maior que 34,4º.

Por sua vez, a estação POA apresenta ocorrência de cintilação ionosférica em fase apresenta quase linearidade, apresentando um leve aumento de cintilação entre as 00h e as 3h. No que se diz a respeito da magnitude, pode-se observar que a maior ocorrência é fraca bem como na janela de maior ocorrência pode-se observar que há uma pequena porcentagem de ocorrência moderada (entre 17,2º e 34,4°) e que o pico de cintilação em fase se localiza a 1h.

Calculando a CCDF para a cintilação em fase a Figura 22, temos no eixo X os limiares que σ_{φ} , em radianos, poderá ser maior e o eixo Y traz o valor de probabilidade, e as curvas são demonstradas a cada hora, entre as 20h e as 4h, para ser analisado comportamento da variação diurna da cintilação em fase.

Figura 22 - CCDF - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação diurna




PRU2 - Presidente Prudente/SP
00h - UTC
01h - UTC
02h - UTC
03h - UTC
04h - UTC
20h - UTC
21h - UTC
22h - UTC
23h - UTC
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ
POAL - Porto Alegre/RS
00h - UTC
01h - UTC
02h - UTC
03h - UTC
04h - UTC
20h - UTC
21h - UTC
22h - UTC
23h - UTC
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ

A partir da Figura 22 é possível observar que a estação de SLMA possui pouca probabilidade que os valores sejam maiores que 0,4 rad (22,9°) mesmo quando atinge sua maior ocorrência entre as 23h e a 1h. Entre as 23h e as 1h pode-se notar que há maior probabilidade que ocorre cintilação de maior magnitude do que nos outros horários do dia, sendo a 0h o horário que possui maior probabilidade da cintilação em fase assumir valores da faixa moderada.

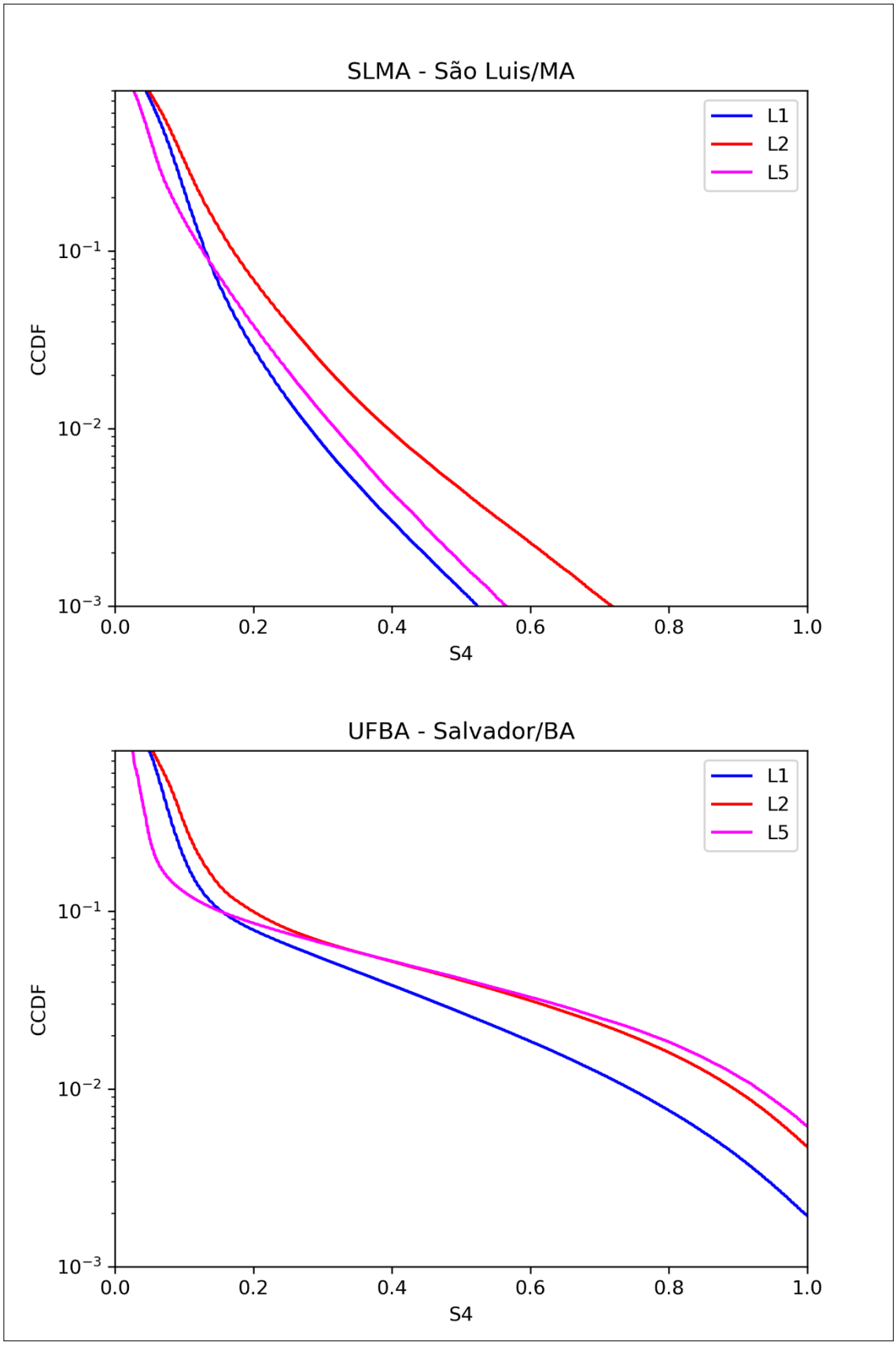
Observou-se na estação UFBA, que se tem maior probabilidade de ocorrência de cintilação em fase as 23h - UTC e que a cintilação neste horário pode assumir valores maiores que 28° com uma probabilidade de 2%. Ainda pode-se observar na estação UFBA que o período com maior probabilidade de ocorrência de cintilação moderada e forte é entre as 22h e as 2h.

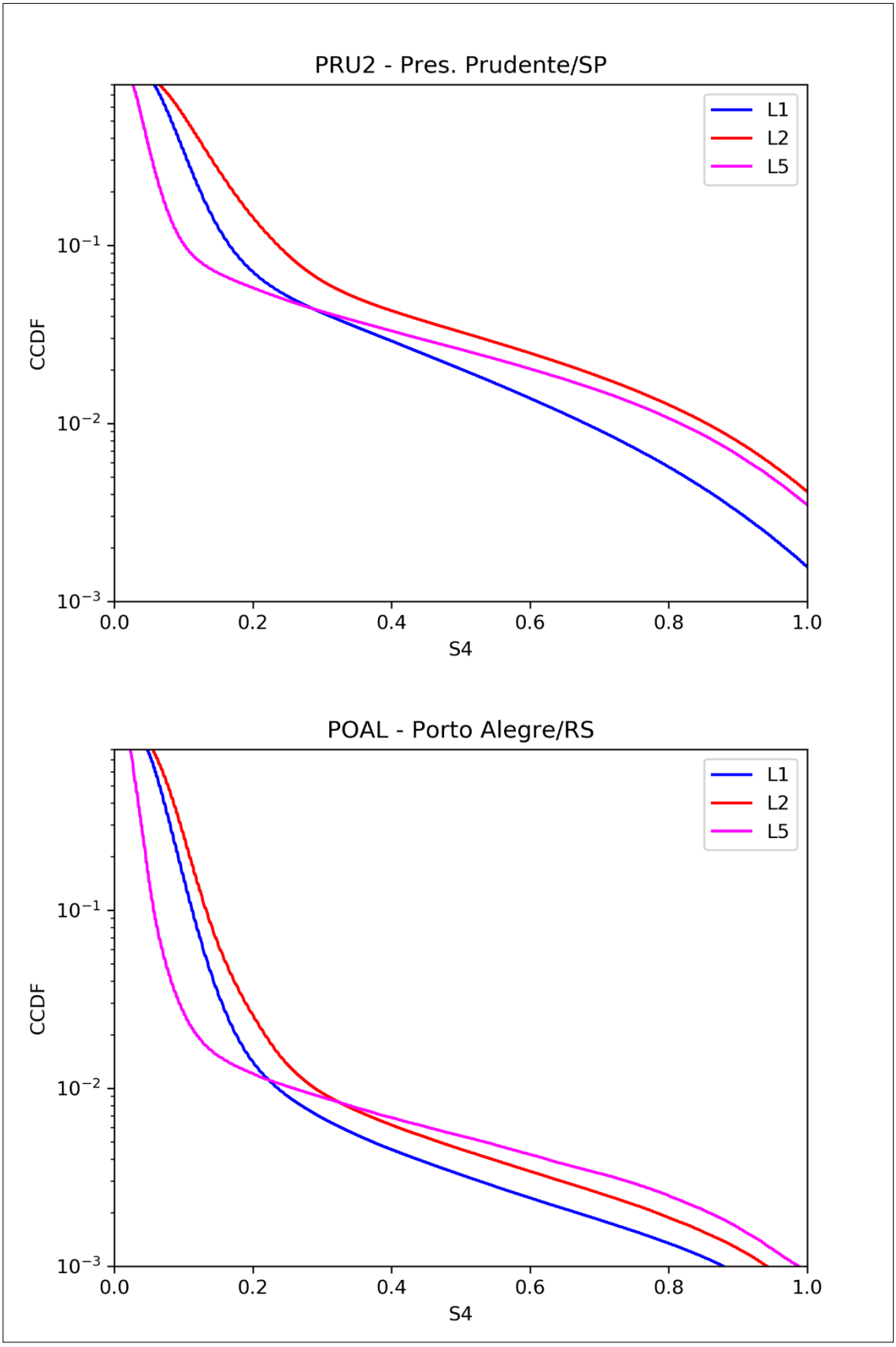
Já a estação PRU2 se mostrou com maior probabilidade de ocorrência de valores maiores que 0,6 as 0h - UTC, cerca de 2% de ocorrência. Observou que a estação possui probabilidade de quase 1% de assumir valores maiores que 0,8 radianos (≈ 45°) as 0h.

Para a estação POAL, tem-se menos 0,01% de ocorrência de cintilação moderada e forte entre as 0h e a 1h, sendo essa a janela ocorrência mais alta da cintilação. Já entre as 21h e as 2h os valores podem chegar a até 0,57 com probabilidade de 0,01%, no entanto a probabilidade de que ocorra valores maiores que 0,3 é menor 0,04%.

Com a finalidade de comparar a ocorrência nas demais frequências (L5 e L2), calculou-se a CCDF para quatro estações em destaque. A Figura 23 mostra os resultados comparativos para a cintilação em amplitude entre as três frequências, utilizando todos os satélites disponíveis. No eixo X a probabilidade que os valores sejam maiores que o limiar e o eixo Y apresentem a probabilidade de que eles ocorram, bem como as curvas representam as frequências L1 (azul), L2 (vermelho) e L5 (magenta).

Figura 23 - CCDF - Comparação de S_4 entre as frequências L1, L2 e L5 no período entre as 21h e as 4h




PRU2 - Pres. Prudente/SP
L1
L2
L5
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4
POAL - Porto Alegre/RS
L1
L2
L5
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4

A partir da janela com maior ocorrência de cintilação, obtivemos a Figura 23 que apresenta a probabilidade que os valores de S_4 sejam maiores que determinado limiar. É possível observar na estação SLMA que quando os valores de S_4 são menores, ou seja, a cintilação em amplitude é mais fraca, a frequência L5 tem menor probabilidade de ser influenciada do que as demais frequências. Porém quando analisamos S_4 a partir de 0,17, podemos observar que L1 apresenta menor influência de cintilação moderada, forte e saturada que L5 e L2.

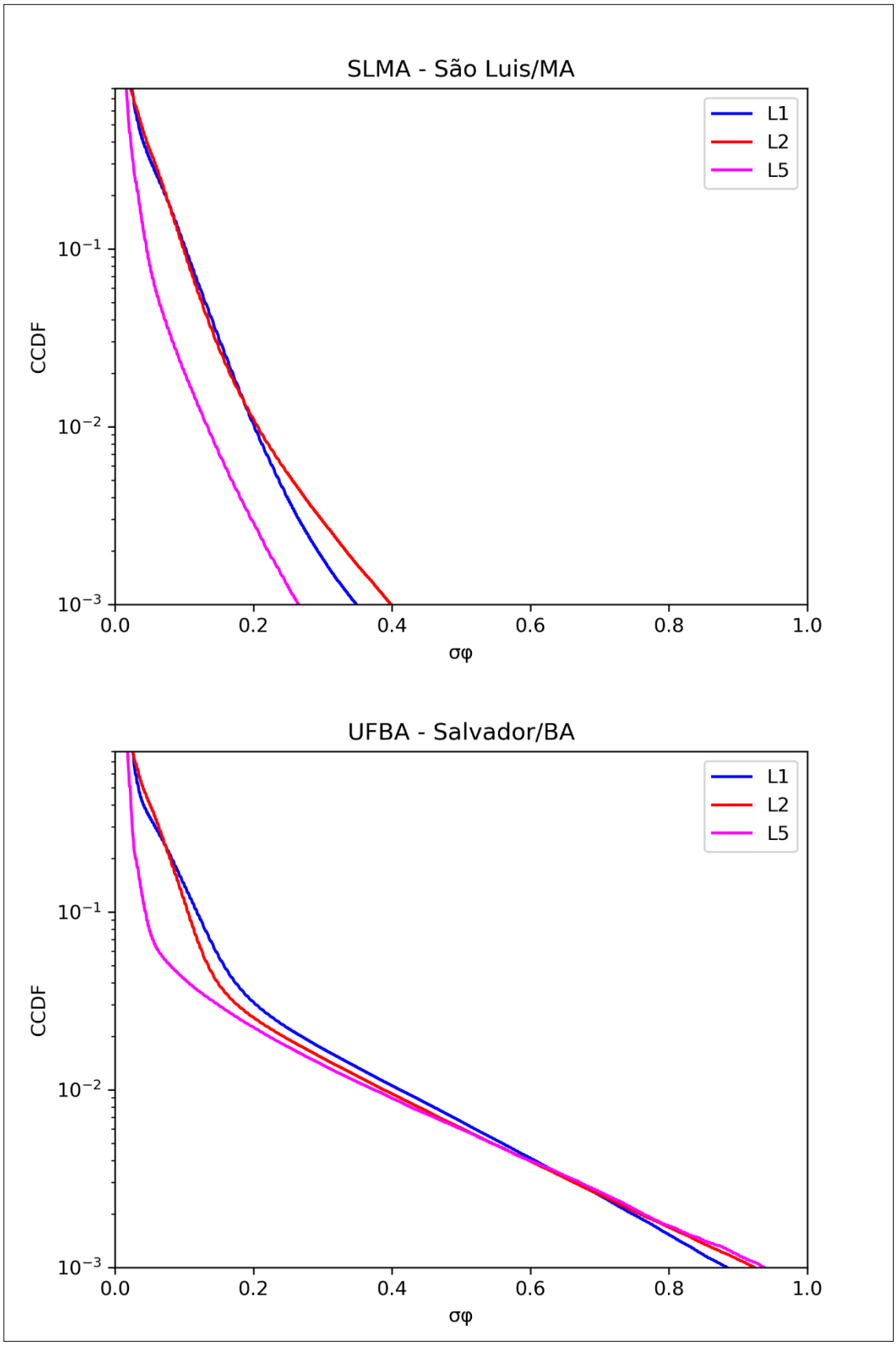
Na estação UFBA podemos observar que novamente L1 apresenta menor influência de cintilação maior que moderada e que L5 apresenta maior influência na cintilação em amplitude, quando os valores de S_4 são maiores que 0,30. Analisando a probabilidade de que S_4 assuma valor maior que 0,80, temos que para L1 é de aproximadamente 0,7%, enquanto para L2 é 1,07% e para L5 temos 1,10%.

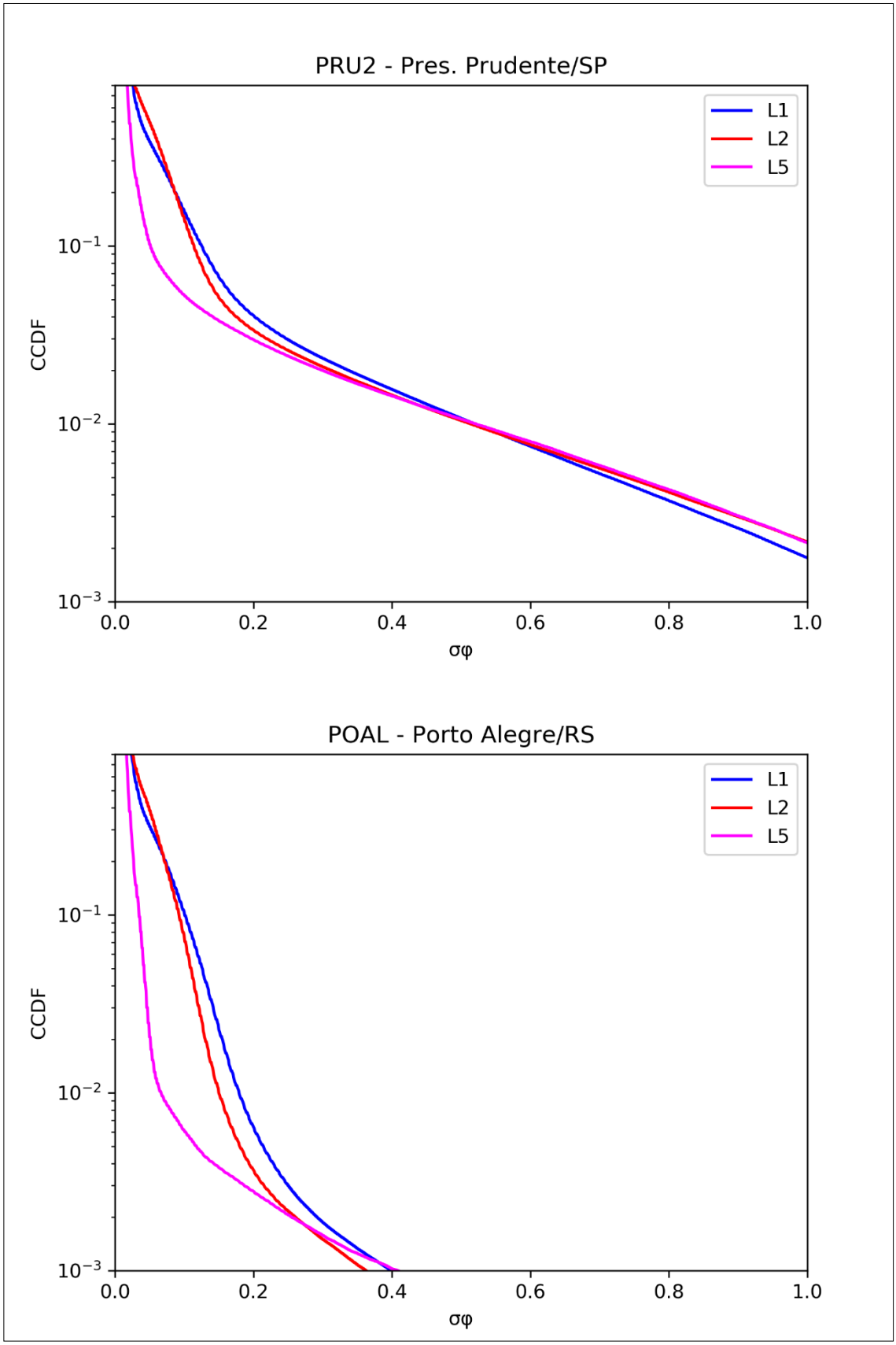
Na estação PRU2, podemos observar que a cintilação em amplitude possui maior influência sobre a frequência L2, não importando o valor de S_4. Já L1 e L5 apresentam comportamento similar ao observado nas demais estações: quando S_4 assume a valores menores L5 possui menor probabilidade de influência, já quando a cintilação ocorre moderada, forte ou saturada temos que L1 possui menor probabilidade. Ainda, quando a cintilação apresenta valor maior que 0,80 é possível notar que a probabilidade de ocorrência é de 0,06% em L1, já em L5 é aproximadamente 1% e em L2 temos um pouco mais que 1% de probabilidade.

Na estação POAL os efeitos são mais brandos, os valores de S_4 maior que 0,8 não passam de 0,03% de probabilidade de ocorrência, nem quando se considera L5, frequência que sofre maior influência da cintilação em amplitude. Observa-se também que a probabilidade de que haja cintilação fraca é menor em L5 que nas demais frequências e essa probabilidade aumenta conforme o aumento do valor de S_4, chegando a ser quase 20% maior que em L1.

Para a análise da cintilação em fase, utilizou-se a CCDF calculada nas três frequências (Figura 24) de modo análogo ao realizado para cintilação em amplitude. Novamente, temos o eixo X a probabilidade que os valores sejam maiores que o limiar e o eixo Y apresentem a probabilidade de que eles ocorram, além disso tem-se as curvas representam as frequências L1 (azul), L2 (vermelho) e L5 (magenta).

Figura 24 - CCDF - Comparação de σ_φ entre as frequências L1, L2 e L5 no período entre as 21h e as 4h




PRU2 - Pres. Prudente/SP
L1
L2
L5
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ
POAL - Porto Alegre/RS
L1
L2
L5
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ

A Figura 24 apresenta a probabilidade que os valores de σ_φ sejam maiores que determinado limiar. Na estação SLMA é possível notar que independe dos valores de σ_φ L5 sempre apresenta menor influência do que as demais. Observa-se também que até aproximadamente 0,2 rad (11,5°) as frequências L1 e L2 apresentam valores muito próximos de probabilidade de ocorrência.

Na estação UFBA podemos observar que novamente L1 apresenta menor influência de cintilação maior que moderada e que L5 apresenta maior influência da cintilação em fase, quando os valores de σ_φ são maiores que 0,80 rad (45°). Temos ainda que para L1 a probabilidade de ocorrência é de aproximadamente 0,015%, e para as demais frequências os valores são próximos.

Já na estação PRU2, pode-se notar que a cintilação em fase nas frequências L1 e L5 apresentam comportamento similar ao observado nas demais estações: quando σ_φ assume valores menores L5 possui menor probabilidade de ser influenciada, já quando a cintilação ocorre moderada, forte temos que L1 possui menor probabilidade. Também se observou, que a cintilação apresenta valor maior que 0,80 a probabilidade de ocorrência é de 0,04% em L1 e em L2 e L5 é de aproximadamente 0,05%.

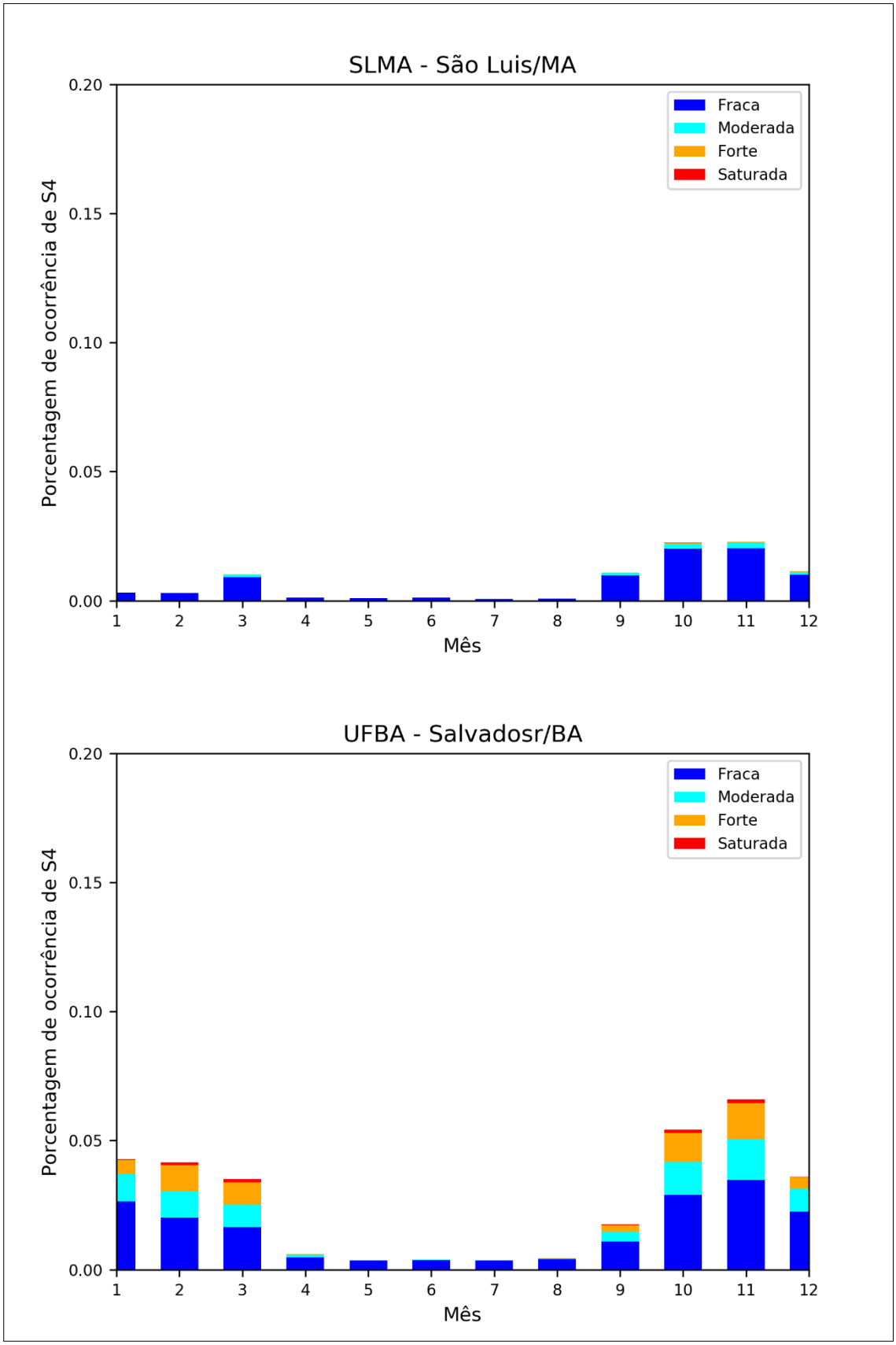
Na estação POAL os efeitos são mais brandos. Os valores de σ_φ maior que 0,3 rad (17,8°) não passam de 0,015% de probabilidade de ocorrência, nem quando se considera L1, frequência que possui maior influência da cintilação em fase para esta estação. Observa-se também que a probabilidade de que haja cintilação fraca é menor em L5 que nas demais frequências e essa probabilidade aumenta conforme o aumento do valor de σ_φ, e a partir de 0,3 temos que L2 é quem tem a menor probabilidade de sofrer influências de cintilação ionosférica.

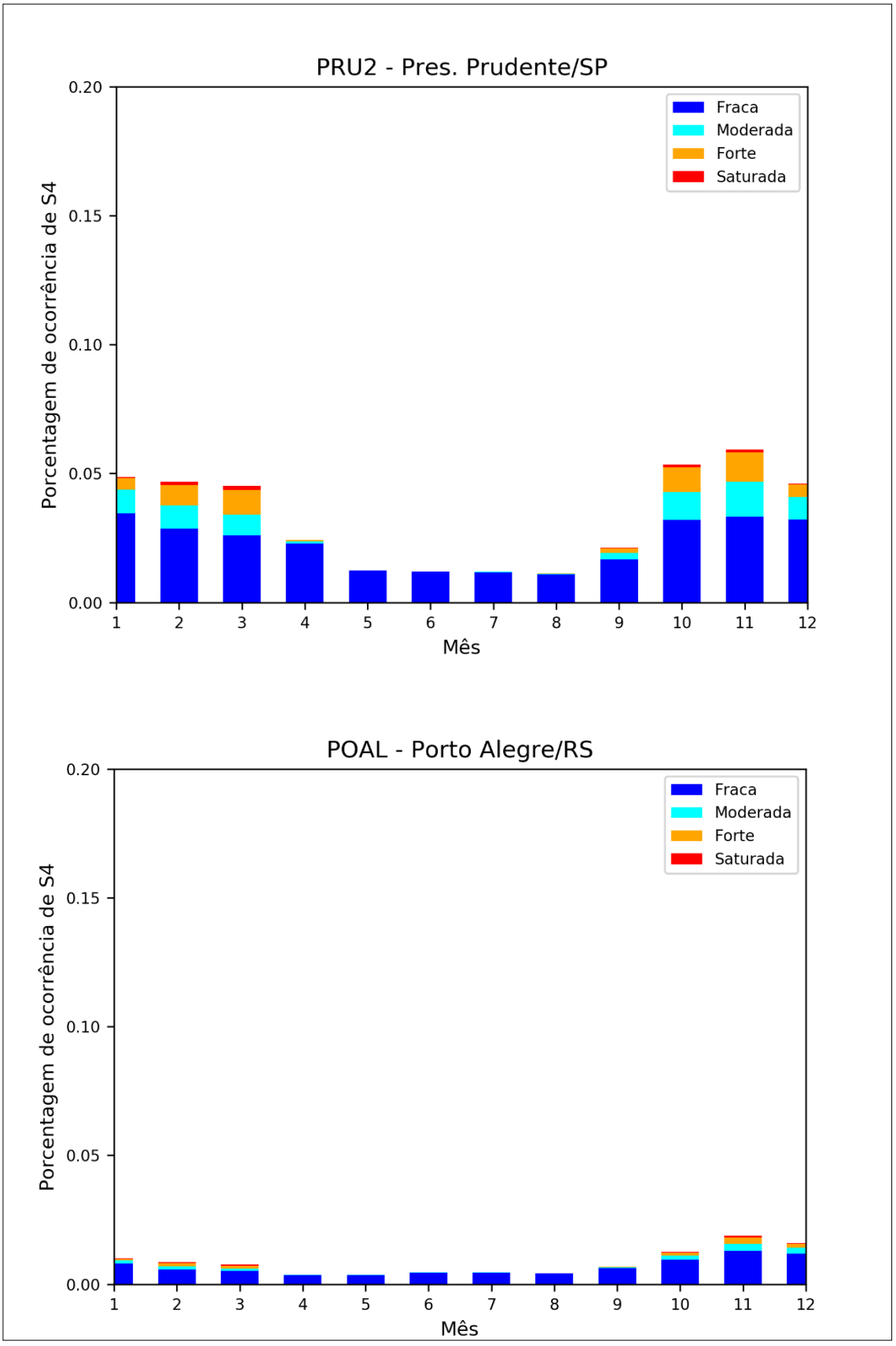
Moraes et al. (2017) apresenta uma análise da ocorrência da cintilação ionosférica e traz que, em comparação com as demais frequências, L5 se mostrou mais passível de influência de cintilação, tanto em fase quanto em amplitude, enquanto L1 apresentou menos influência. No entanto, no experimento de Moraes et al. (2017) a proporção dessa influência é maior, uma vez que os estudos apresentados no trabalho são para períodos de considerável ocorrência de cintilação ionosférica.

6.2. Variação sazonal

A partir dos dados disponíveis foi possível também observar a influência da sazonalidade na cintilação ionosférica. Assim, obteve-se a porcentagem de ocorrência de cintilação ionosférica em amplitude e em fase para cada estação utilizando as frequências disponíveis. Na análise da cintilação e amplitude utilizou os mesmos limiares para classificação dados por Muella (2009). A Figura 25 apresenta os resultados para a cintilação em amplitude utilizando L1, sendo o os meses representados pelo eixo X e no eixo Y é apresentada a porcentagem de ocorrência da cintilação, utilizando o índice S_4.

Figura 25 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com os meses




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Porcentagem de ocorrência de S4
Mês
Fraca
Moderada
Forte
Saturada
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
POAL - Porto Alegre/RS
Porcentagem de ocorrência de S4
Mês
Fraca
Moderada
Forte
Saturada
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

A partir da Figura 25 é possível observar que a estação localizada mais ao norte do país (SLMA) apresentou maior ocorrência de cintilação fraca no período de setembro a março, sendo os meses de outubro e novembro com mais ocorrências dessa magnitude bem como com maior ocorrência de cintilação moderada, chegando próximo a 2% de ocorrência. Já de abril a agosto pode-se notar que a ocorrência de cintilação é bem baixa, com aproximadamente 1% de ocorrência.

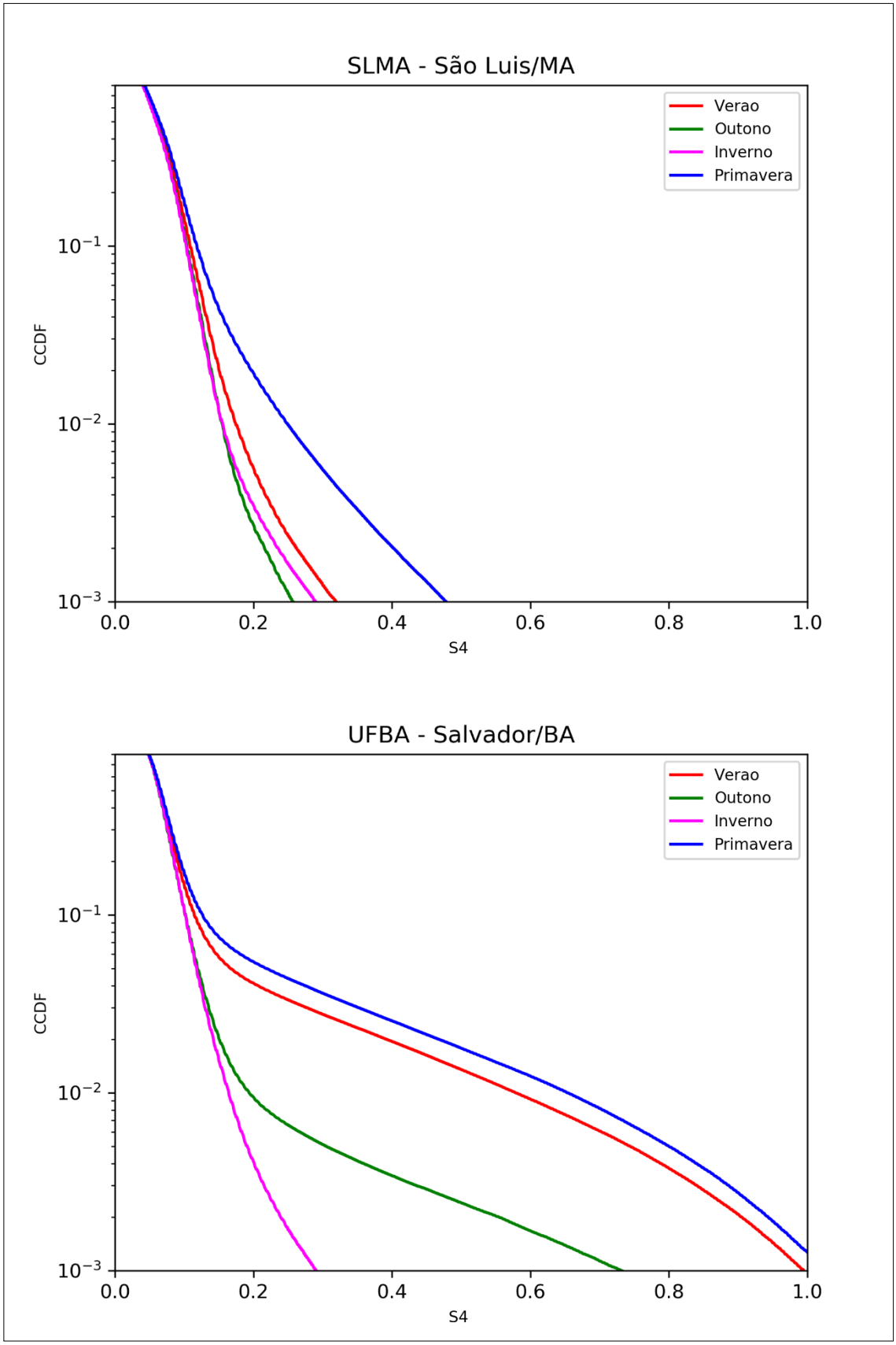
Na estação UFBA tem-se que os meses de abril a agosto não apresenta uma quantidade significativa de cintilação, e que de setembro a março temos maior ocorrência de cintilação em amplitude. O mês de novembro, diferentemente do que foi encontrado na estação SLMA, apresentou maior ocorrência de cintilação, aproximadamente 8%. Observou-se também que o mês de março apesar de não se mostrar com muita ocorrência de cintilação fraca, apresentou maior ocorrência de cintilação saturada.

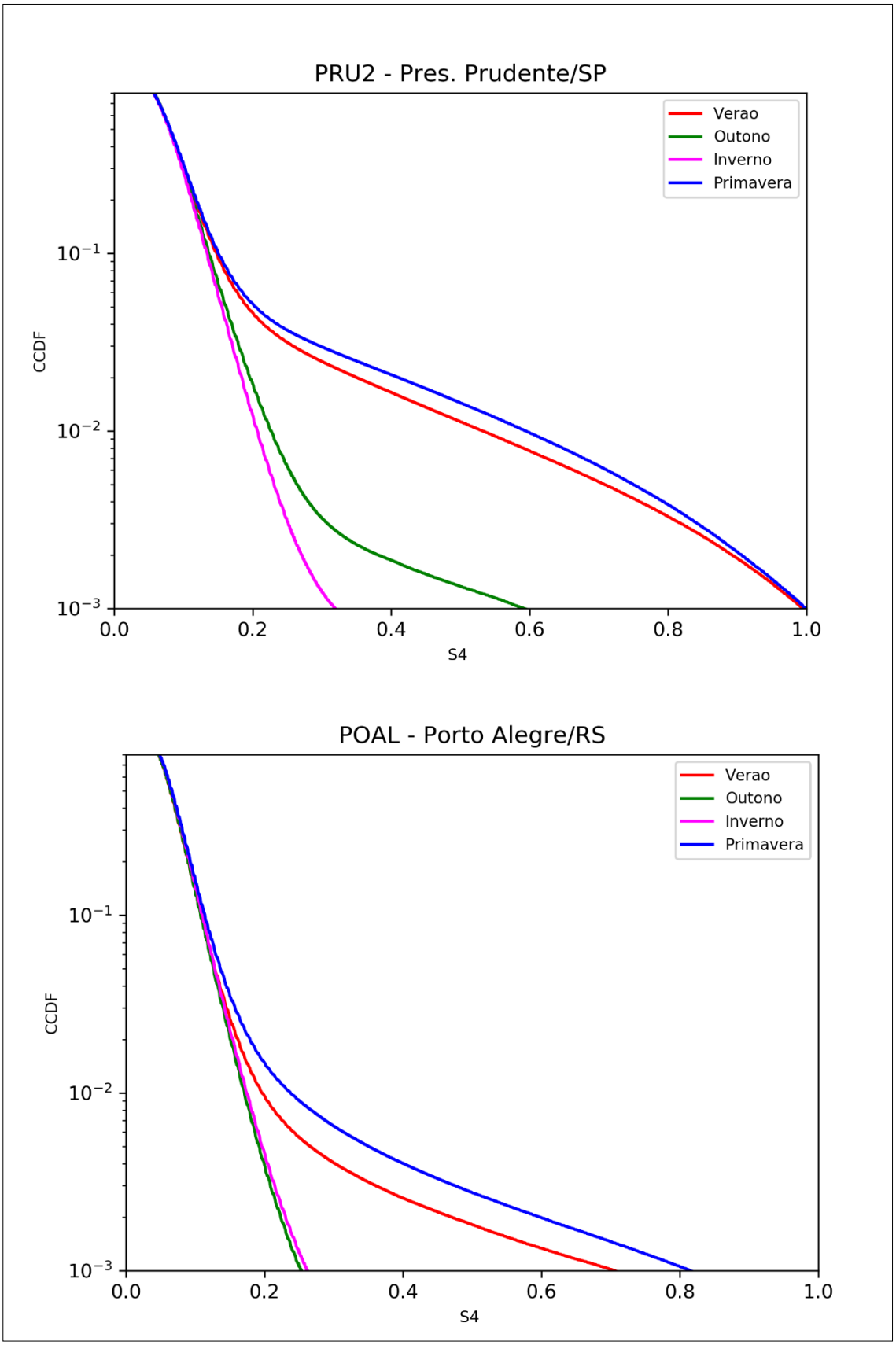
Já na estação PRU2, temos novamente o mês de novembro apresentando maior ocorrência de cintilação ionosférica, aproximadamente 6%, seguido dos meses de outubro com 5% e março com valor próximo a 4%. Novamente observa-se que apesar de novembro ocorrer mais cintilação, em março a ocorrência se dá de modo mais forte. Já os meses de abril e setembro temos mais cintilação quando comparamos com as estações SLMA e UFBA, porém são meses mais brandos. Já de maio até agosto a cintilação tem pouca ocorrência.

Em POAL, a ocorrência de cintilação ionosférica não passa de 2% e a maior ocorrência é fraca, sendo sua janela de maior ocorrência entre outubro e março. Para esta estação novembro ocorre mais cintilação, mas em comparação com PRU2, por exemplo, a ocorrência é bem menor.

Para um melhor entendimento, calculou-se a CCDF, que mostra a probabilidade que determinado valor seja maior que um limiar (Figura 26). No eixo X temos os limiares que S_4 poderá assumir ser maior, enquanto no eixo Y são apresentados os valores dessa probabilidade e as curvas são apresentadas pelas estações do ano, possibilitando a análise da sazonalidade de cada estação.

Figura 26 - CCDF - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 variação de acordo com os meses




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Verao
Outono
Inverno
Primavera
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4
POAL - Porto Alegre/RS
Verao
Outono
Inverno
Primavera
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4

A partir da Figura 26 é possível observar que a estação de SLMA possui pouca probabilidade que os valores sejam maiores que 0,5 mesmo quando atinge sua maior ocorrência durante a primavera. Já no outono e no inverno pode-se notar que ocorrência de cintilação é bem menor, não atingindo 0,3. No verão o valor de probabilidade de ocorrência chega aos 0,3, mesmo com 0,1% de probabilidade de ocorrência.

Na estação UFBA, observa-se também que se tem maior probabilidade de ocorrência de cintilação em amplitude na primavera, porém em comparação com SLMA a probabilidade de ocorrência para valores fortes e saturados é bem maior. Na primavera temos 1% de ocorrência acima de 0,6 e para o verão temos quase a mesma probabilidade de ocorrência.

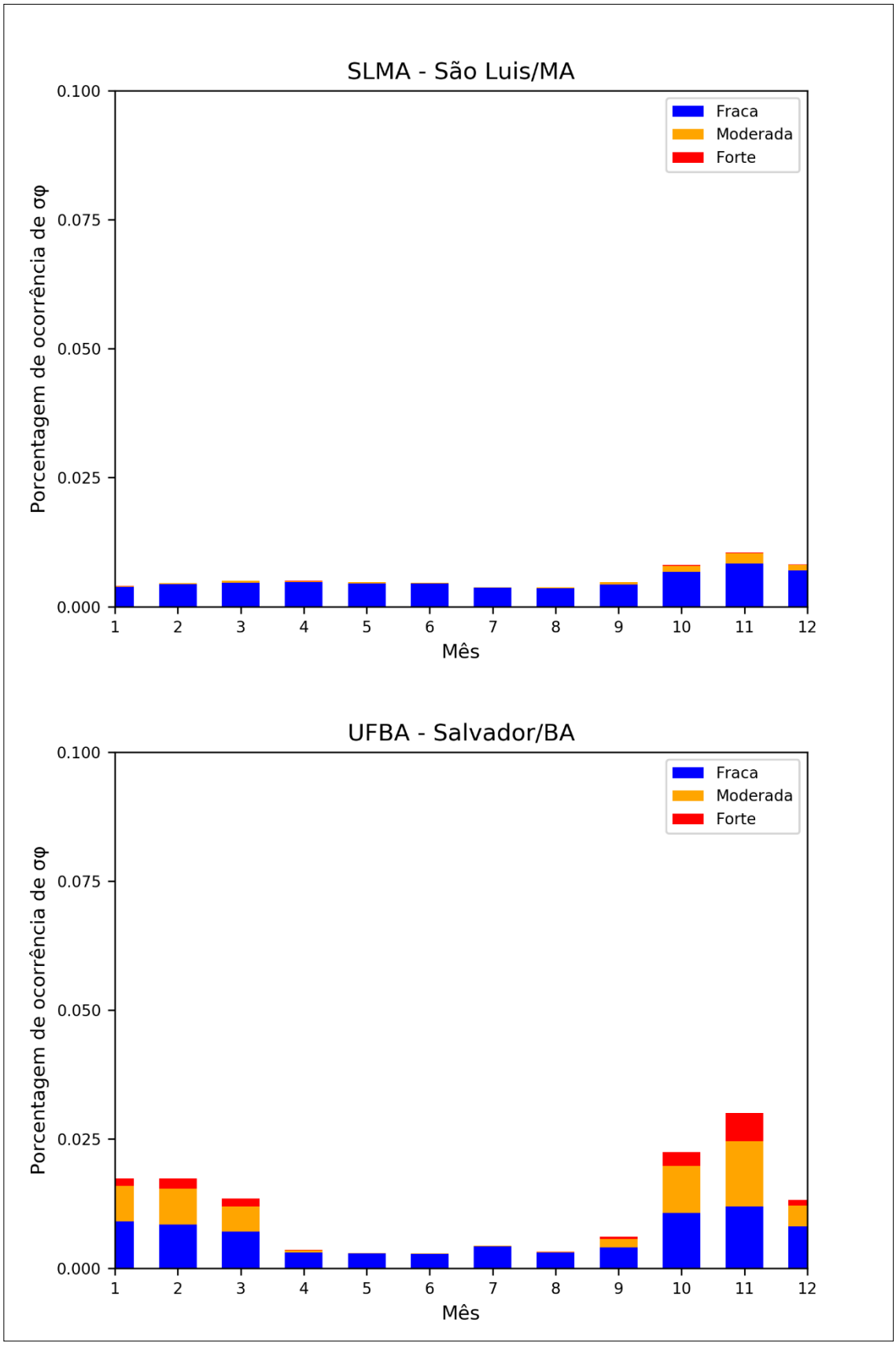
Já a estação PRU2 possui maior probabilidade de ocorrência na primavera e verão, no outono os valores podem chegar próximos a 0,60 e no inverno não passam 0,30.

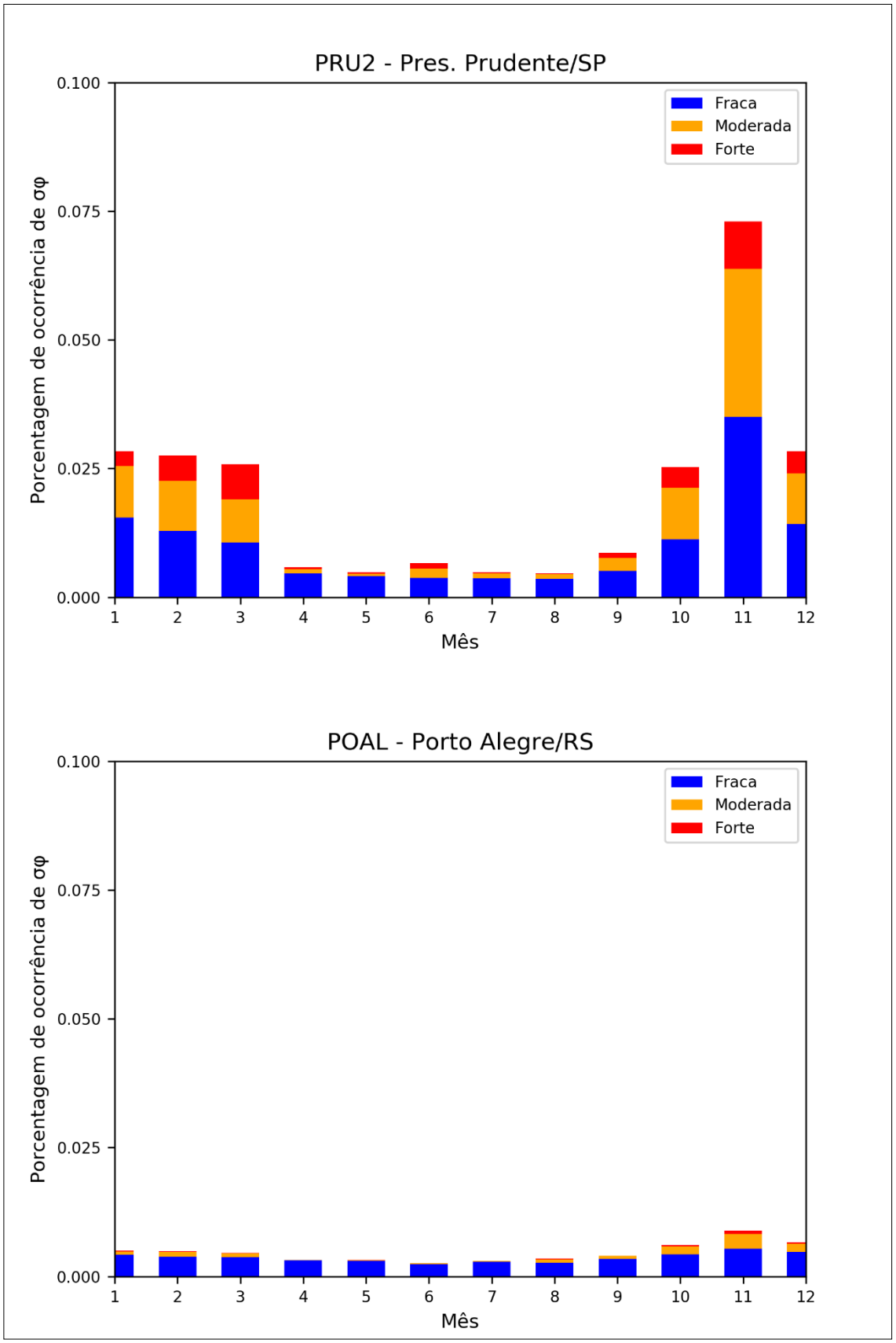
Para a estação POAL, tem-se que os valores durante a primavera podem chegar a 0,80 com a probabilidade de 0,80, porém quando se analisa o outono e o inverno, podemos observar que os não passam de 0,3%.

Na

Figura 27 é apresentada essa porcentagem de ocorrência utilizando a frequência L1, sendo o eixo X os meses e no eixo Y a porcentagem de ocorrência, classificada de acordo com Hegarty (2001).

Figura 27 - GBSC - Ocorrência de σ_{φ} nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com os meses




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Fraca
Moderada
Forte
Porcentagem de ocorrência de σφ
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
Mês
POAL - Porto Alegre/RS
Fraca
Moderada
Forte
Porcentagem de ocorrência de σφ
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
Mês

Na Figura 27, observa-se que de acordo com os limiares definidos por Hegarty (2001), foi possível notar que para a estação SLMA os valores de cintilação em fase podem chegar a 30%, sendo a maior parte cintilação fraca. Ainda se observa que os meses de outubro e novembro possuem maior cintilação, seguido de março. Já nos outros meses os valores de ocorrência de cintilação em fase são baixos.

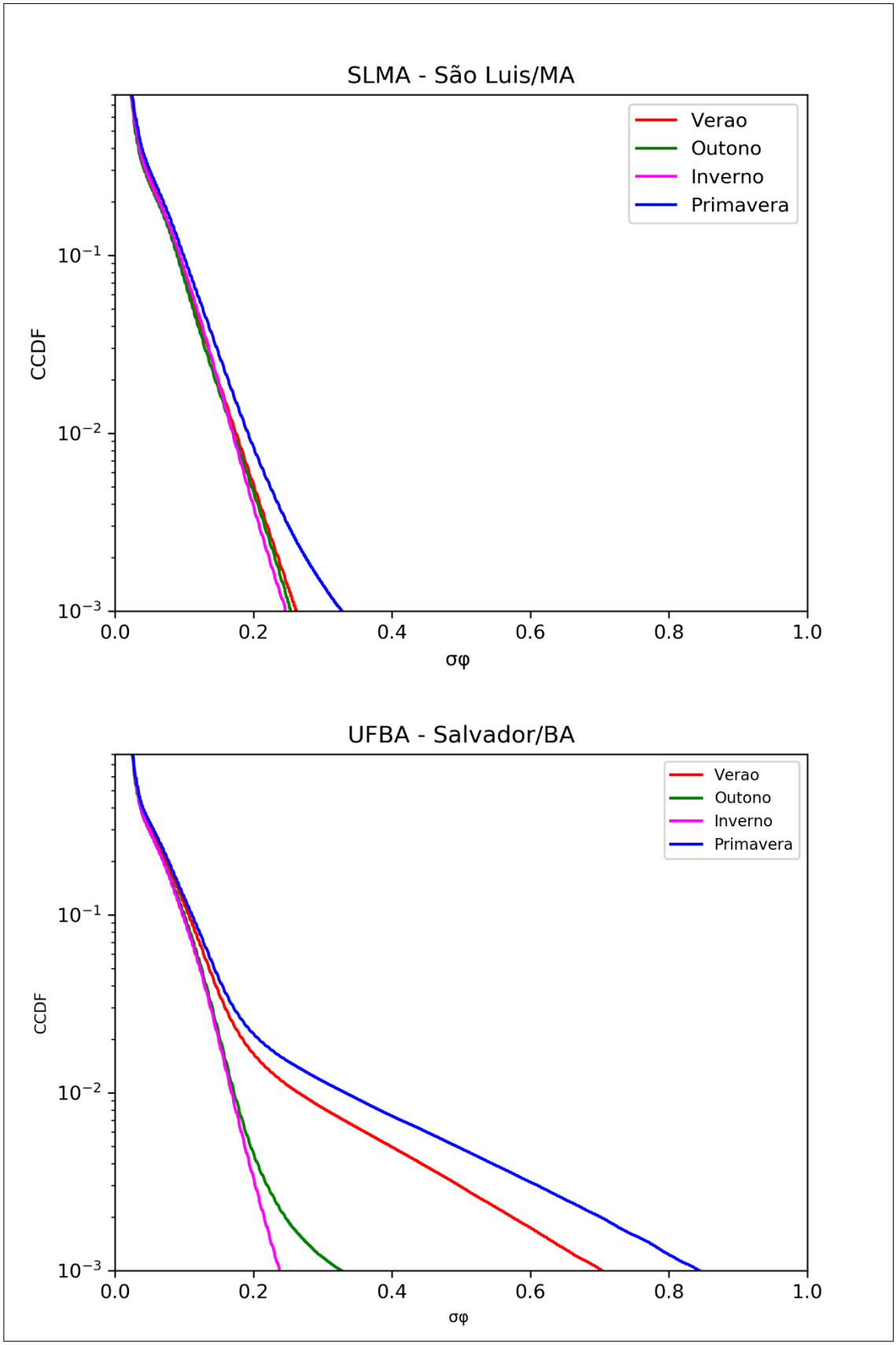
Na estação UFBA, pode-se notar que há ocorrência de cintilação moderada e forte de dezembro a março, tendo em novembro maior ocorrência e em julho o mês com menor ocorrência de cintilação em fase.

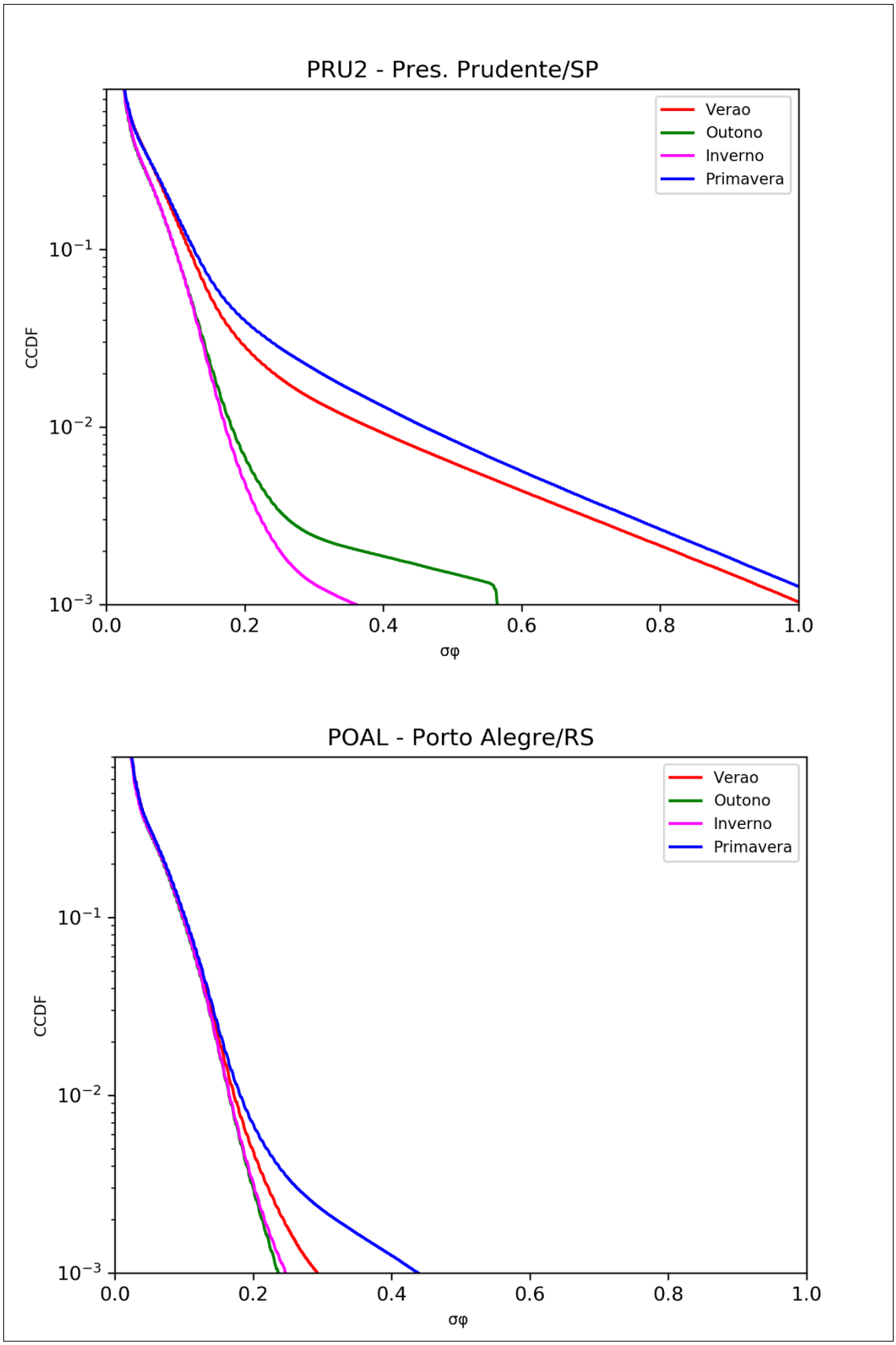
Já a estação PRU2, apresenta aproximadamente 45% de ocorrência de cintilação em fase sendo em torno de 3,5% dessa ocorrência moderada ou forte no mês de novembro. É possível observar também que de abril a setembro a ocorrência é do nível fraca, e de outubro a março a região apresenta ocorrência também, em níveis moderados e fortes.

A estação de POAL é dominada por cintilação fraca. No mês de novembro tem-se 0,6% de ocorrência moderada, sendo este o mês com maior ocorrência de cintilação em fase para a estação POAL.

Calculando a CCDF para a cintilação em fase a Figura 28, temos no eixo X os limiares que σ_{φ}, em radianos, poderá ser maior e o eixo Y traz o valor de probabilidade, e a sazonalidade é representada pelas curvas.

Figura 28 - CCDF - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com os meses




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Verao
Outono
Inverno
Primavera
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ
POAL - Porto Alegre/RS
Verao
Outono
Inverno
Primavera
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ

Observou-se na estação SLMA, que se tem maior probabilidade de ocorrência de cintilação em fase na primavera e que a cintilação neste horário pode assumir valores maiores que 17,8° com uma probabilidade de, aproximadamente, 0,2%. Já para o verão, outono e inverno não probabilidade de ocorrência maior que 17,8.

Na estação UFBA, se tem maior probabilidade de ocorrência de cintilação em fase na primavera, seguindo verão, outono e inverno. No verão a probabilidade que a cintilação chegue a 34,4° é de 0,2% aproximadamente, já na primavera é de 0,4%. No outono e no inverno os valores não chegam a 23°.

PRU2 apresenta maior ocorrência de cintilação na primavera, com probabilidade de quase 0,3% serem maiores que 46°. No verão os valores de probabilidade de ocorrência são bem similares. Já na primavera e no outono a probabilidade de ocorrência é bem menor, sendo que na primavera os valores não chegam a 23°.

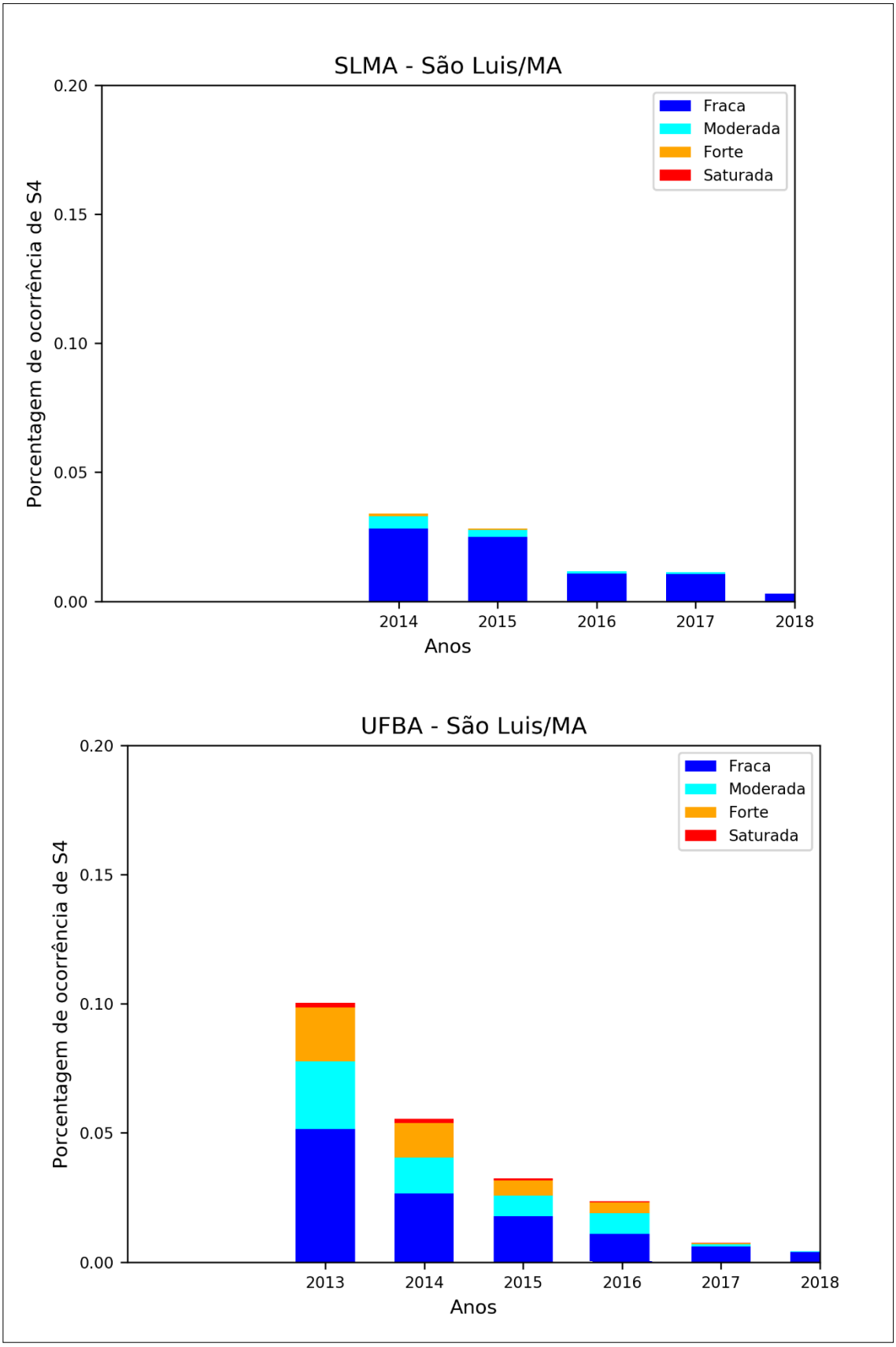
Para a estação POAL, com exceção da primavera, a cintilação ocorre apenas de forma fraca. Na primavera, temos que os valores podem chegar a 23° com uma probabilidade de aproximadamente 0,15%.

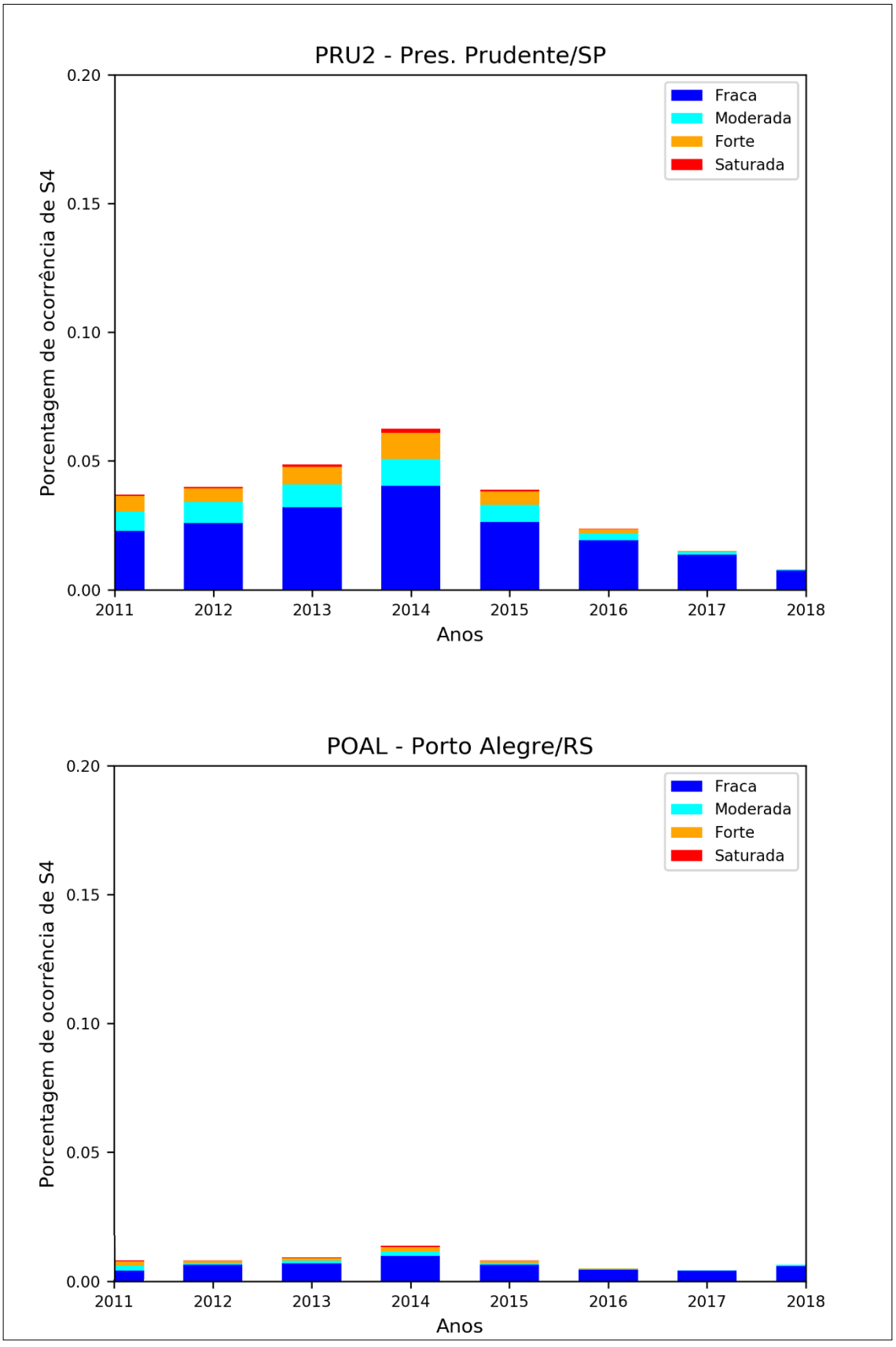
De acordo com Muella et al. (2017) que faz uma análise climatológica para a estação localizada em Cachoeira Paulista, apresenta que de setembro a março a cintilação em amplitude apresenta maior influência nos sinais GNSS, enquanto junho apresenta uma menor influência.

6.3. Variação de acordo com o ciclo solar

A partir dos dados disponíveis foi possível também observar a variação de acordo com o ciclo solar. Assim, obteve-se a porcentagem de ocorrência de cintilação ionosférica em amplitude e em fase para cada estação utilizando as frequências disponíveis. Na análise da cintilação e amplitude utilizou os mesmos limiares para classificação dados por Muella (2009). A Figura 29 apresenta os resultados para a cintilação em amplitude utilizando L1, sendo o os anos representados pelo eixo X e no eixo Y é apresentada a média da porcentagem de ocorrência da cintilação durante o período analisado, utilizando o índice S_4.

Figura 29 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com o ciclo solar




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Porcentagem de ocorrência de S4
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
Anos
Fraca
Moderada
Forte
Saturada
POAL - Porto Alegre/RS
Porcentagem de ocorrência de S4
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
Anos
Fraca
Moderada
Forte
Saturada

A partir da Figura 29 possível observar que a estação de SLMA apresentou maior ocorrência de S_4 no ano de 2014 e menor ocorrência no ano de 2018. Em 2018 é possível observar que a ocorrência não chega a ser moderada e forte. Em 2014 é possível notar a ocorrência de cintilação acima do nível moderado.

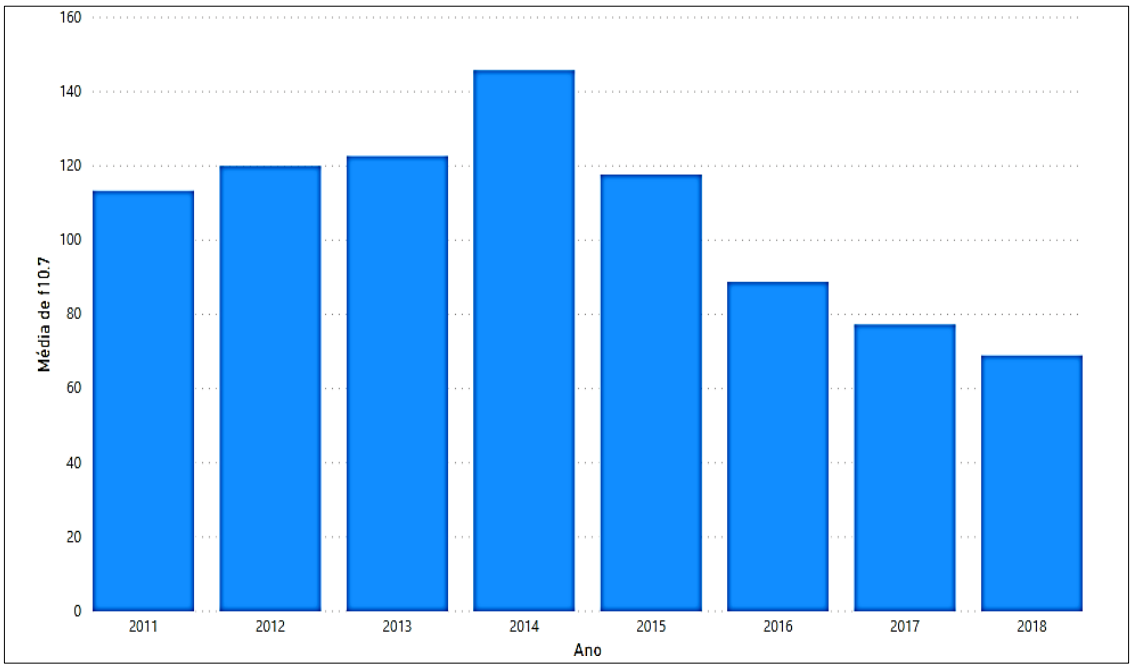
Já a estação UFBA apresentou em 2013 seu maior pico, porém devido ao seu curto período de coleta não deve ser considerado. Sendo assim, o ano de 2014 apresentou maior ocorrência segui do dos anos de 2015, 2016, 2017 e sendo 2018 o ano que houve menor ocorrência de cintilação em amplitude.

Na estação PRU2, diferente do que aconteceu na estação UFBA, tem-se que a porcentagem de ocorrência é maior no ano de 2014 ocorrendo cintilação do fraco até saturado, chegando a aproximadamente 7% de ocorrência de cintilação. Nota-se que os

Para a estação POAL, tem-se que em teve-se um aumento na porcentagem de ocorrência até 2014, onde houve maior ocorrência de cintilação em amplitude e há uma diminuição na porcentagem de ocorrência até o ano de 2018.

O índice F10.7 pode ser utilizado para o estudo da atividade solar na frequência dos 2,8 GHz (McNAMARA, 1991). A Figura 30 apresenta a média anual do índice 10.7 no eixo Y e no eixo X temos os anos.

Figura 31 - Média anual do fluxo solar - Índice F10.7

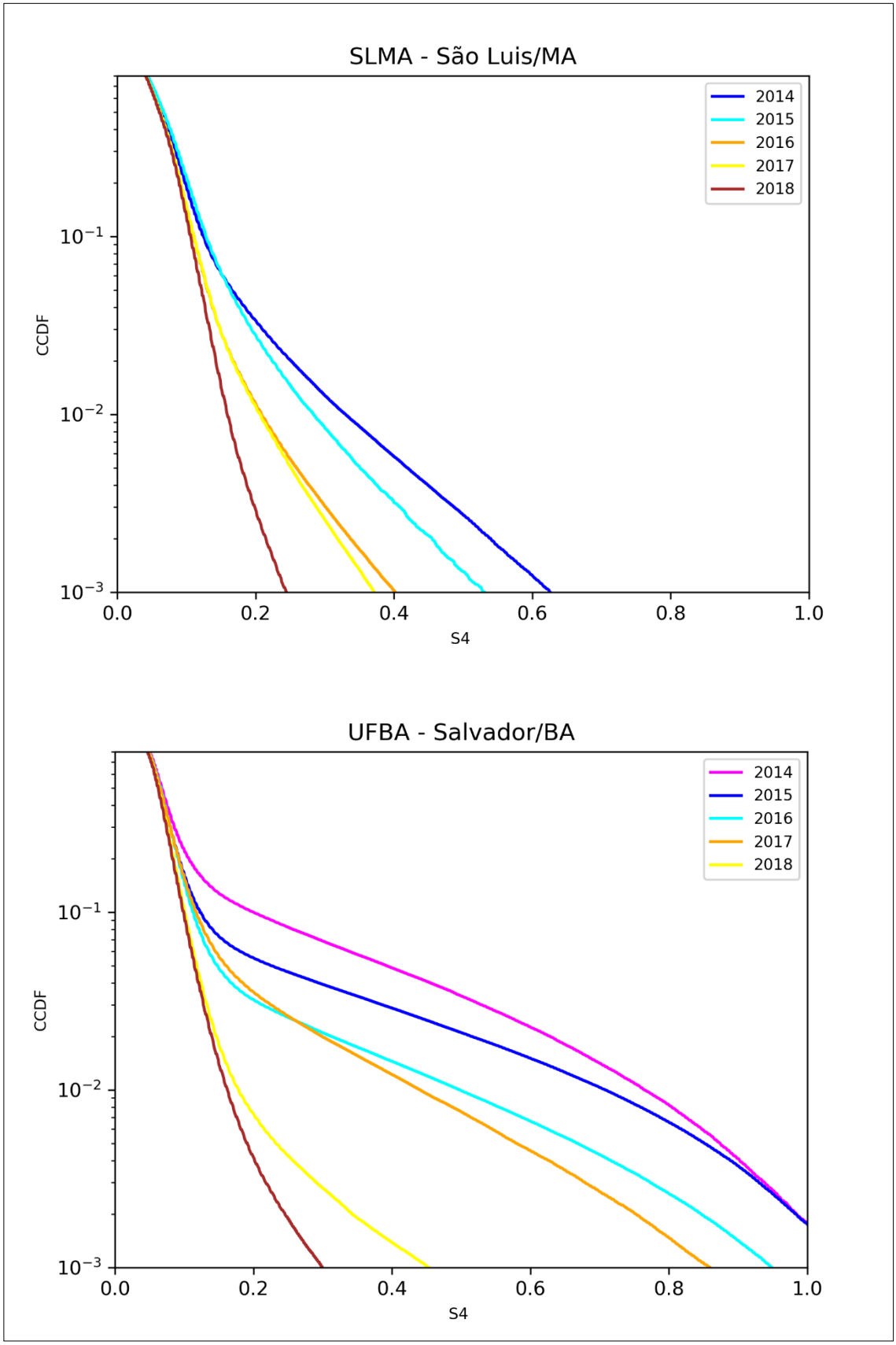


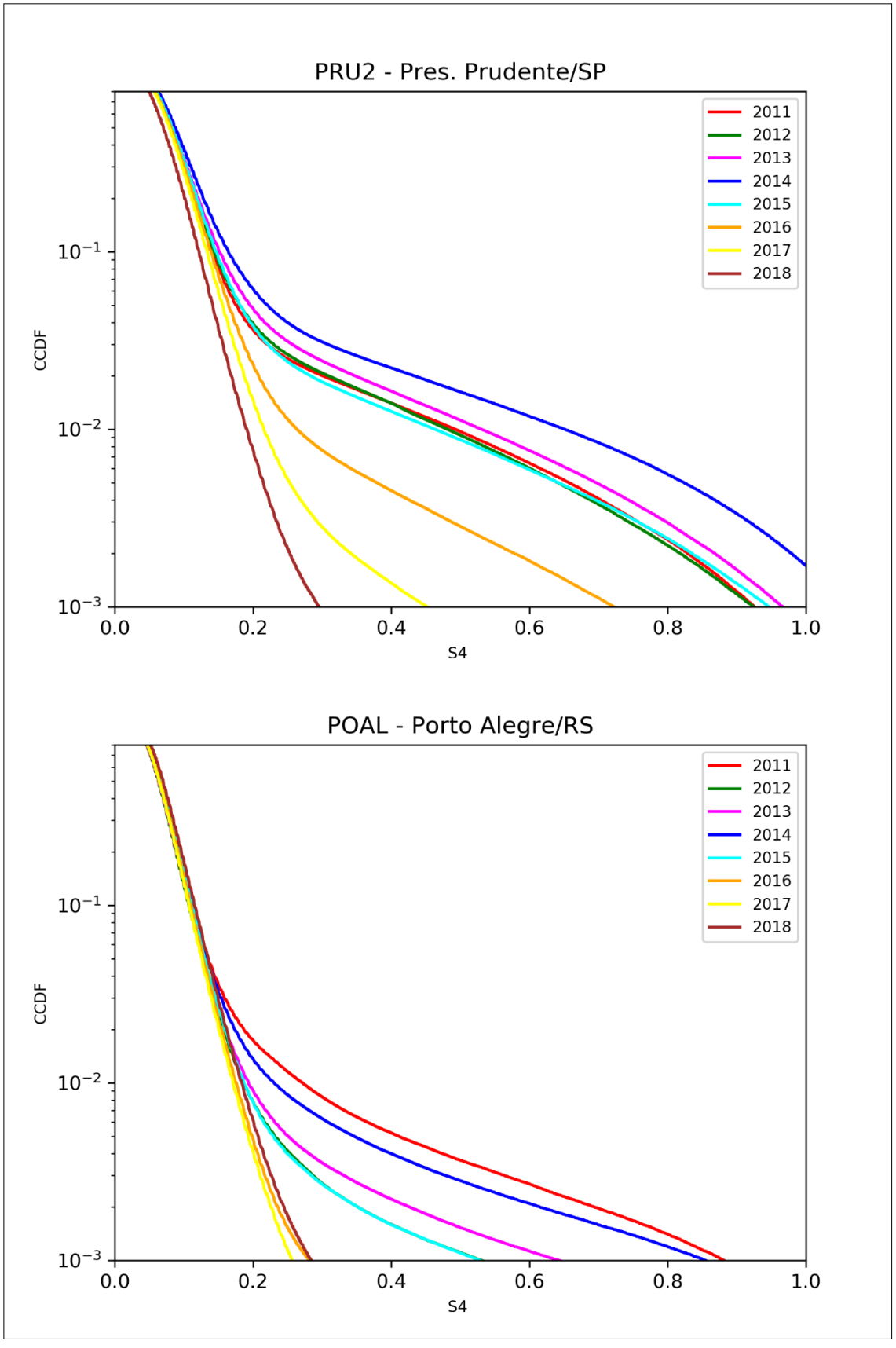
Adaptado de LISIRD (2021)

Pode-se observar que o ano de 2014 possui o pico de atividade solar, e posteriormente ocorre um decréscimo considerável, sendo em 2018 a atividade mais branda que no restante do período

Na Figura 32 é apresentada essa probabilidade de ocorrência utilizando a frequência L1, sendo o eixo X o valor de S_4 e o eixo Y a probabilidade de ocorrência.

Figura 32 - CCDF - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 variação de acordo com o ciclo solar




PRU2 - Pres. Prudente/SP
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4
POAL - Porto Alegre/RS
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
S4

Na Figura 32, observa-se que a estação SLMA apresentou os valores de cintilação em fase podem chegar a valores maior que 0,6 mesmo que com uma probabilidade baixa no ano de 2014. Assim como nos gráficos anteriores, pode-se observar que o ano de 2018 apresenta menor probabilidade de ocorrência de cintilação

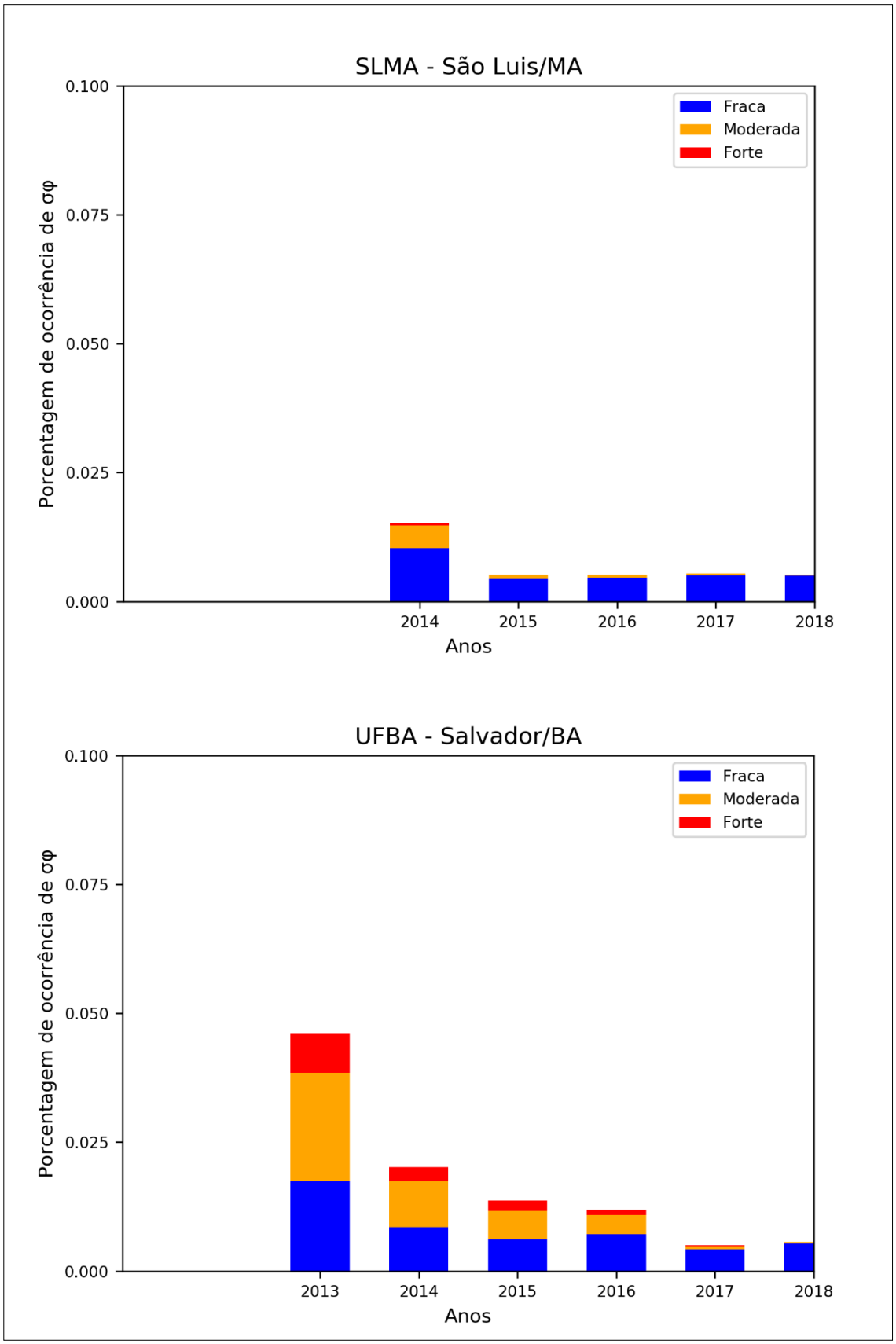
Já na estação UFBA temos que o ano de 2013 apresenta aproximadamente 12% de probabilidade que a cintilação em amplitude seja maior que 0,6, o que não deve ser considerado devido ao período de coleto, enquanto o ano de 2014 apresenta 11%, sendo estes os anos com maior probabilidade de cintilação com nível acima de moderado. Já o ano de 2018 não passa de 0,3 mesmo com uma probabilidade de 0,1%, sendo o ano com menor probabilidade de cintilação forte.

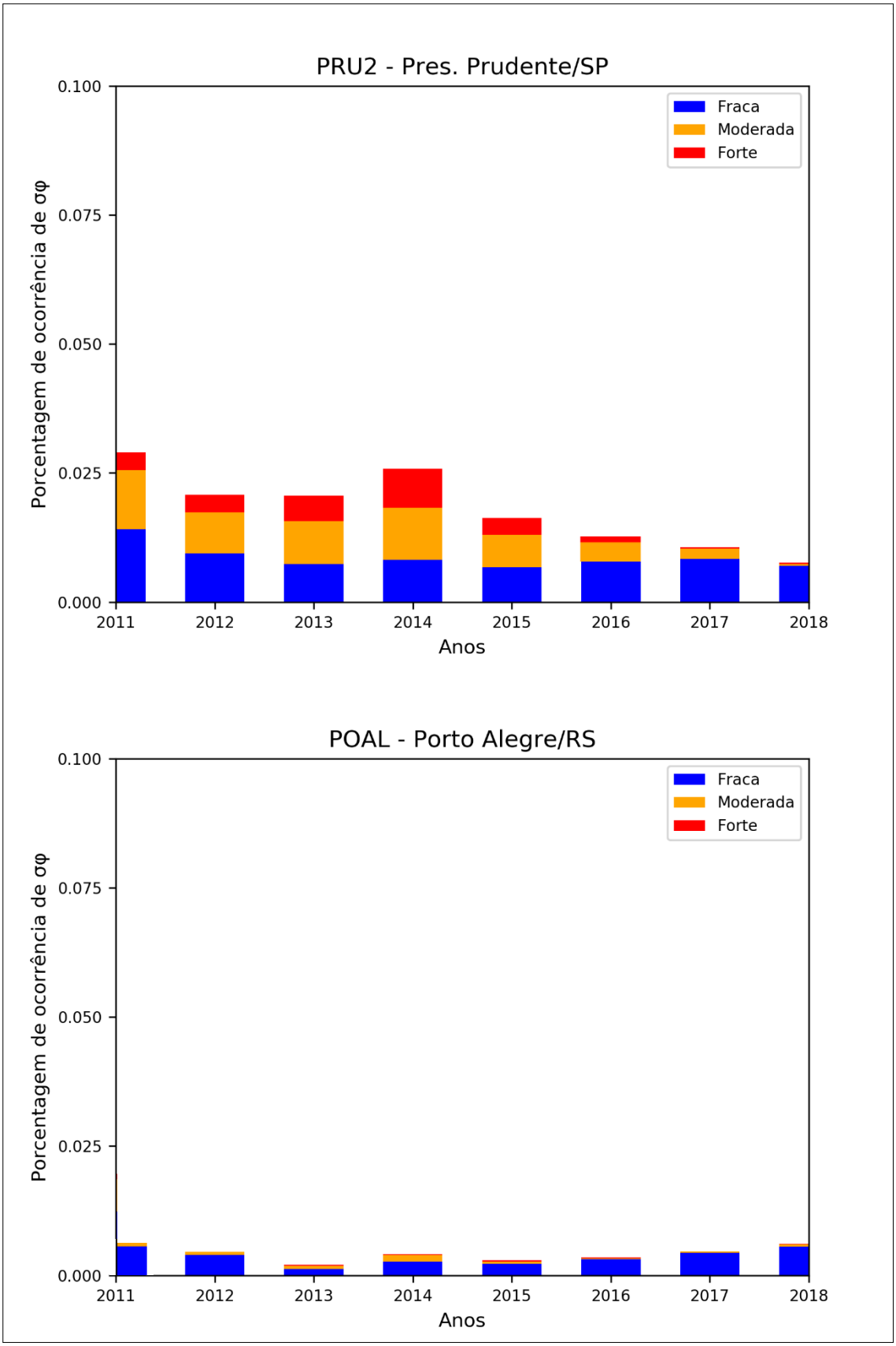
PRU2 por sua vez apresenta maior probabilidade de ocorrência de cintilação forte em 2014, chegando a uma probabilidade de aproximadamente 10% que este valor seja maior que 0,8. O ano com menor probabilidade de ocorrência é 2018 novamente, e este não ultrapassa os 3%.

A estação de POAL possui maior ocorrência em 2014, apresentando probabilidade de 0,15% de ocorrência maior que 0,8 em 2016 a 2018 os valores não ultrapassam os 0,3.

A Figura 33 apresenta os valores da porcentagem de ocorrência para σ_{φ} de 2011 a 2018.

Figura 33 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com o ciclo solar




PRU2 - Pres. Prudente/SP
Fraca
Moderada
Forte
Porcentagem de ocorrência de σφ
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
Anos
POAL - Porto Alegre/RS
Fraca
Moderada
Forte
Porcentagem de ocorrência de σφ
0.100
0.075
0.050
0.025
0.000
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
Anos

A Figura 33, mostra que a cintilação em fase para a estação SLMA apresenta maior ocorrência no ano de 2014 com quase 2,5% de ocorrência, já o ano com menor ocorrência de cintilação em fase é o ano de 2018, com quase 1,5% de ocorrência.

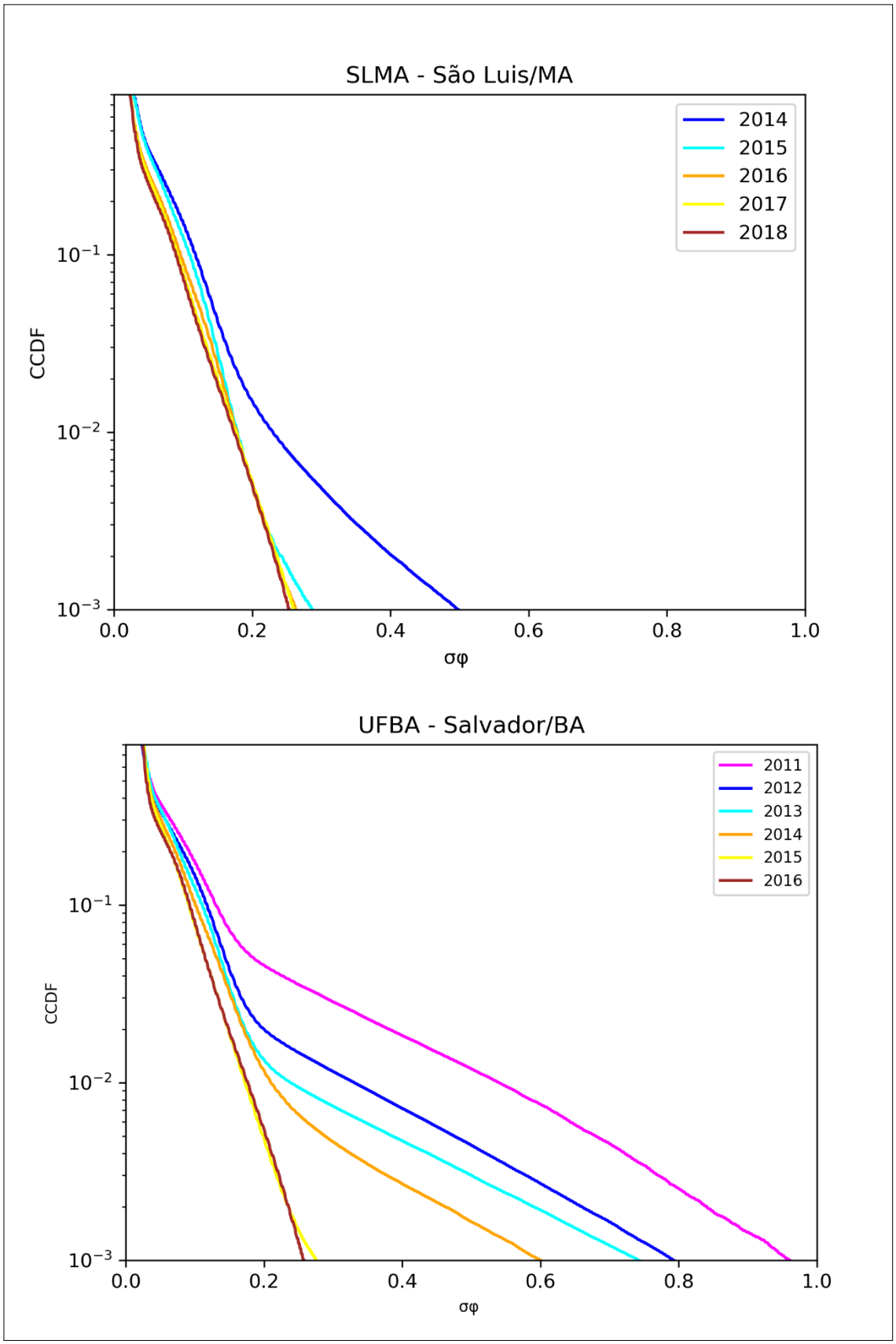
Na estação UFBA é possível observar o ano de 2013 apresentou maior ocorrência de cintilação apresentando cintilação moderada e forte de modo significativo, devido ao seu pouco período de coleta. Enquanto no ano de 2018 pode-se observar que a ocorrência foi apenas fraca, ou seja menor que 34°.

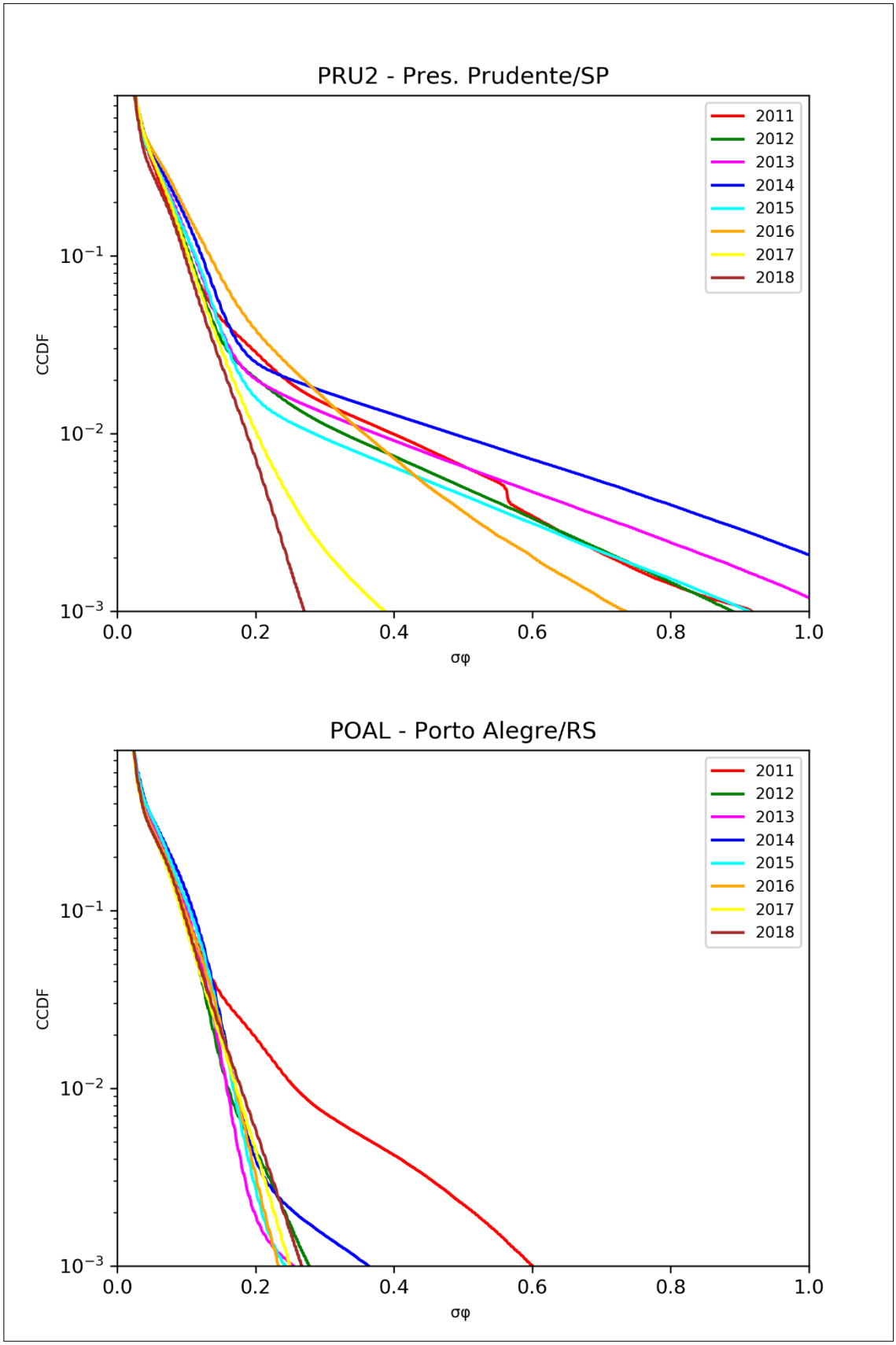
Na estação PRU2, nota-se que em 2014 temos maior ocorrência de cintilação em fase, chegando a quase 2,5%, contando com cintilação fraca, moderada e forte. É possível observar também que em 2018 é o período que ocorre menos cintilação e que ocorre com valores mais brandos.

A estação POAL apresenta cintilação em sua maior parte fraca. Em 2014 temos o ano com maior ocorrência de cintilação ionosférica e em 2018 temos o ano com menor ocorrência.

Para verificar a probabilidade de que a cintilação em fase fosse maior que determinado limiar, calculou-se a CCDF (Figura 34) sendo as curvas a representação dos anos, e no eixo X os limiares que $\sigma_{\varphi,}$ em radianos, poderá ser maior e o eixo Y traz o valor de probabilidade.

Figura 34 - CCDF - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com o ciclo solar




PRU2 - Pres. Prudente/SP
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ
POAL - Porto Alegre/RS
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
CCDF
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
σφ

A Figura 34 apresenta que em 2014 temos a maior probabilidade de ocorrência de cintilação em fase e o seu valor pode chegar a aproximadamente 28° (a 0,5 rad) com uma probabilidade de 0,10%, enquanto em 2018 com essa mesma probabilidade pode-se chegar a um valor de 17,7° (0,3 rad).

Na estação UFBA é possível observar o ano de 2013 apresentou mais de 10% probabilidade que a cintilação em fase seja maior que, aproximadamente, 11° (0,2 rad) , devido ao período em que esta estação estava funcionando, enquanto em 2018 essa probabilidade foi menor que 1%. Ainda se observa que no ano de 2013 existe 1% de probabilidade que a cintilação em fase atinja valores maiores que 34,4° (0,6 rad).

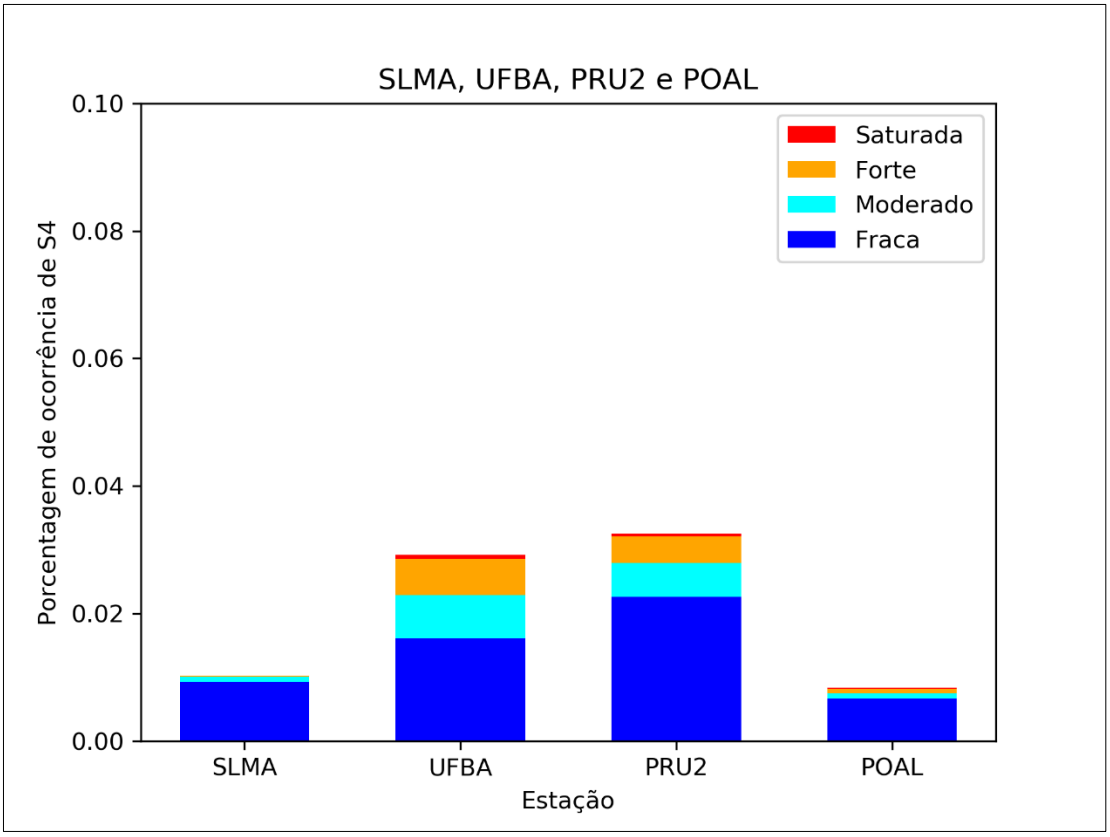
Para a estação PRU2, temos novamente que 2018 é o ano com menor ocorrência de cintilação em fase, com 1% de probabilidade que o valor de σ_{φ} seja maior que 11° (0,2 rad). Já diferentemente da estação UFBA, temos que o ano de 2014 apresenta maior probabilidade de ocorrência de cintilação moderada e forte.

Na estação POAL apresentou em todos os anos analisados uma probabilidade baixa de ocorrência de cintilação em fase, sendo em 2014 o ano que apresenta maior probabilidade de ocorrência de valores próximos a 21,91° (0,4 rad). Relacionando com a cintilação, tanto em amplitude quanto em fase, podemos observar que a atividade solar é correlacionada com ocorrência de cintilação nos sinais GNSS.

6.4. Variação de acordo com a latitude

A partir dos dados disponíveis das estações foi possível também observar a variação de acordo com a latitude. Assim, obteve-se a porcentagem de ocorrência de cintilação ionosférica em amplitude e em fase para cada estação utilizando as frequências disponíveis. Na análise da cintilação e amplitude utilizou os mesmos limiares para classificação dados por Muella (2009). A Figura 35 apresenta os resultados para a cintilação em amplitude utilizando L1, sendo as estações representadas pelo eixo X e no eixo Y é apresentada a média da porcentagem de ocorrência da cintilação durante o período analisado, utilizando o índice S_4.

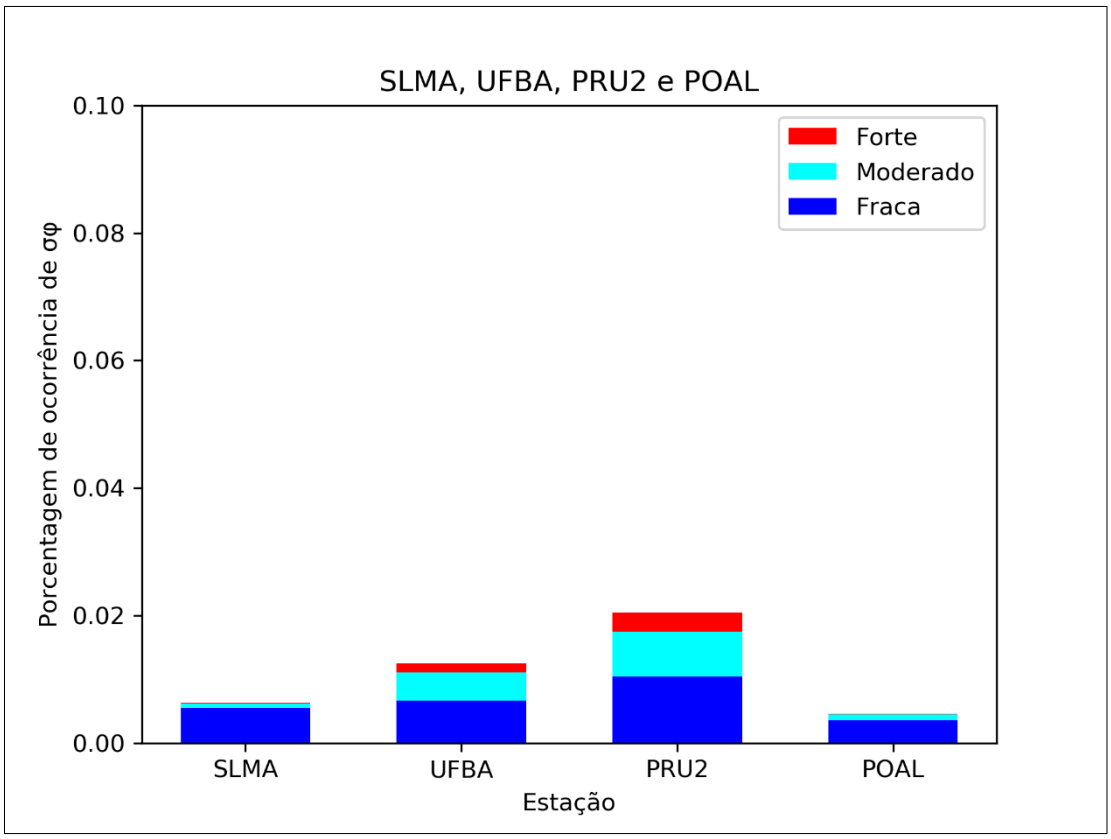
Figura 35 - GBSC - Ocorrência de S_4 nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com a latitude



Na Figura 35 é possível observar que a estação POAL apresenta menor ocorrência de cintilação ionosférica, em torno de 1%, em seguida temos a estação SLMA com 1,2%, a estação UFBA com 3,1% e a estação PRU2 com 3,8% de ocorrência de cintilação ionosférica. Observa-se também que a estação SLMA, apesar de não ser a estação com menor ocorrência de cintilação, é a estação com menor ocorrência de cintilação moderada, forte e saturada. Já a estação POAL, é a que possui menor ocorrência de cintilação em amplitude, porém apresenta mais cintilação moderada, forte e saturada do que a estação SLMA.

A Figura 36 apresenta a porcentagem de ocorrência de cintilação em fase a partir do índice σ_{φ}. No eixo X temos as estações e no eixo Y tem-se a porcentagem de ocorrência, e a classificação é dada novamente por Hegarty (2001), no entanto, dessa vez a classificação ‘muito fraca’ não foi representada no gráfico.

Figura 36 - GBSC - Ocorrência de σ_φ nas estações SLMA, UFBA, PRU2 e POAL utilizando L1 - variação de acordo com a latitude



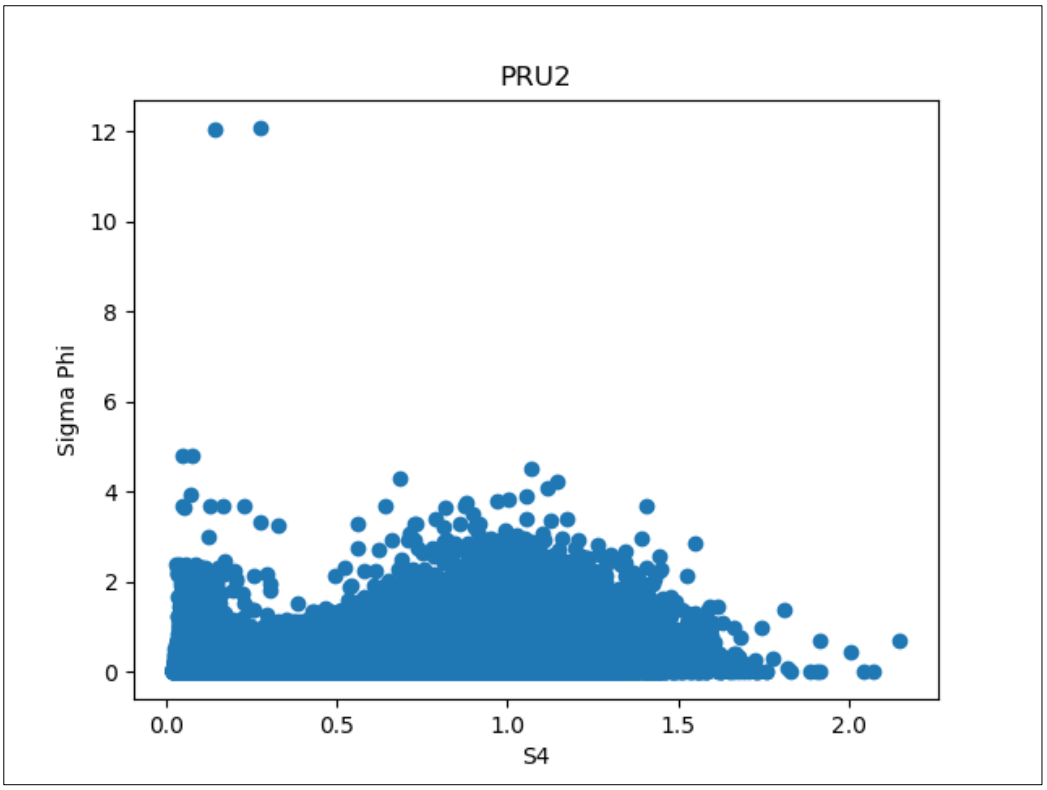
Na Figura 36 é possível observar que a estação POAL, novamente, apresenta menor ocorrência de cintilação, dessa vez em fase, menos de 0,7% e logo após temos a estação SLMA com aproximadamente 0,8%, a estação UFBA com 1,3% e a estação PRU2 com aproximadamente 2,0% de ocorrência de cintilação em fase. Outro fator que se observa, é que a cintilação em fase apesar da ocorrência ser menor na estação POAL sua magnitude é maior que na estação SLMA.

6.5. Correlação entre S_4 e σ_φ

Para o cálculo da correlação entre S_4 e $\sigma\varphi$, selecionou-se a estação PRU2 devido a quantidade de dados disponíveis, maior período em operação, mas apenas a constelação do sistema GPS.

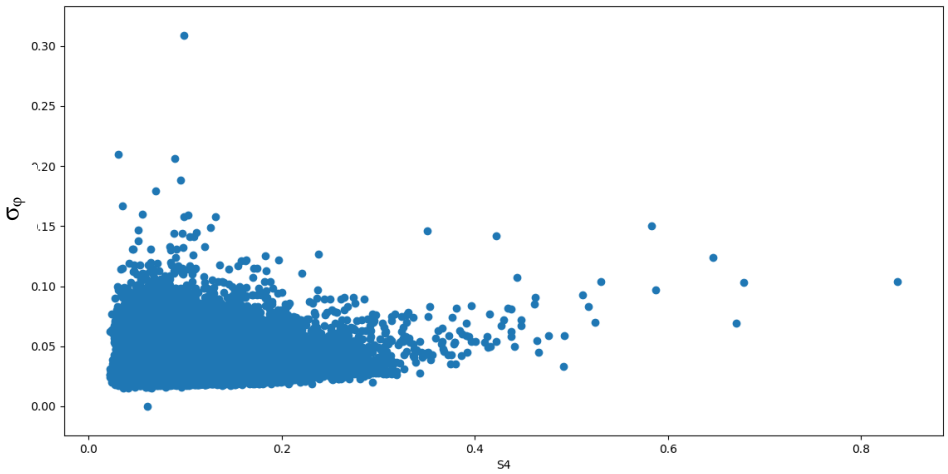
Na Figura 37 temos no X os valores para a cintilação em amplitude (S_4) e no eixo Y temos os valores para cintilação em fase (σ_φ) na estação PRU2, durante todo o período analisado (de 2011 a 2018). Diante da Figura 37, nota-se que os índices estão esparsos impedindo a conclusão de que há correlação entre eles.

Figura 37 - Correlação entre S_4 e σ_φ - 2011 a 2018

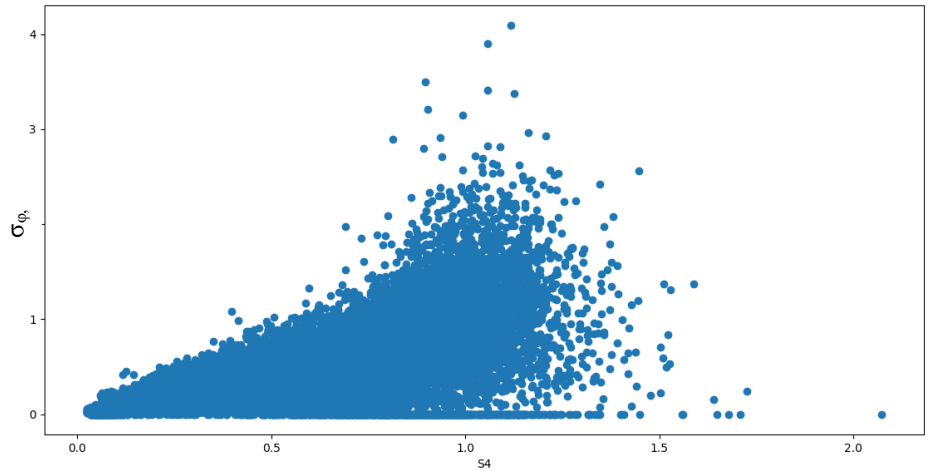


Sendo assim, os dados foram plotados novamente, porém em um período menor. Escolheu-se dois meses com características distintas: Na Figura 35 (a) tem-se a correlação para o mês de junho de 2018, um período de baixa cintilação tanto em amplitude quanto em fase. Já na Figura 38 (b) temos março de 2014, um dos períodos com maior cintilação ionosférica.

Figura 38 - Correlação entre S_4 e σ_φ - Junho/2018 e Março/2014



(a) Correlação entre S_4 e σ_φ - Junho/2018



(b) Correlação entre S_4 e σ_φ - Março/2014

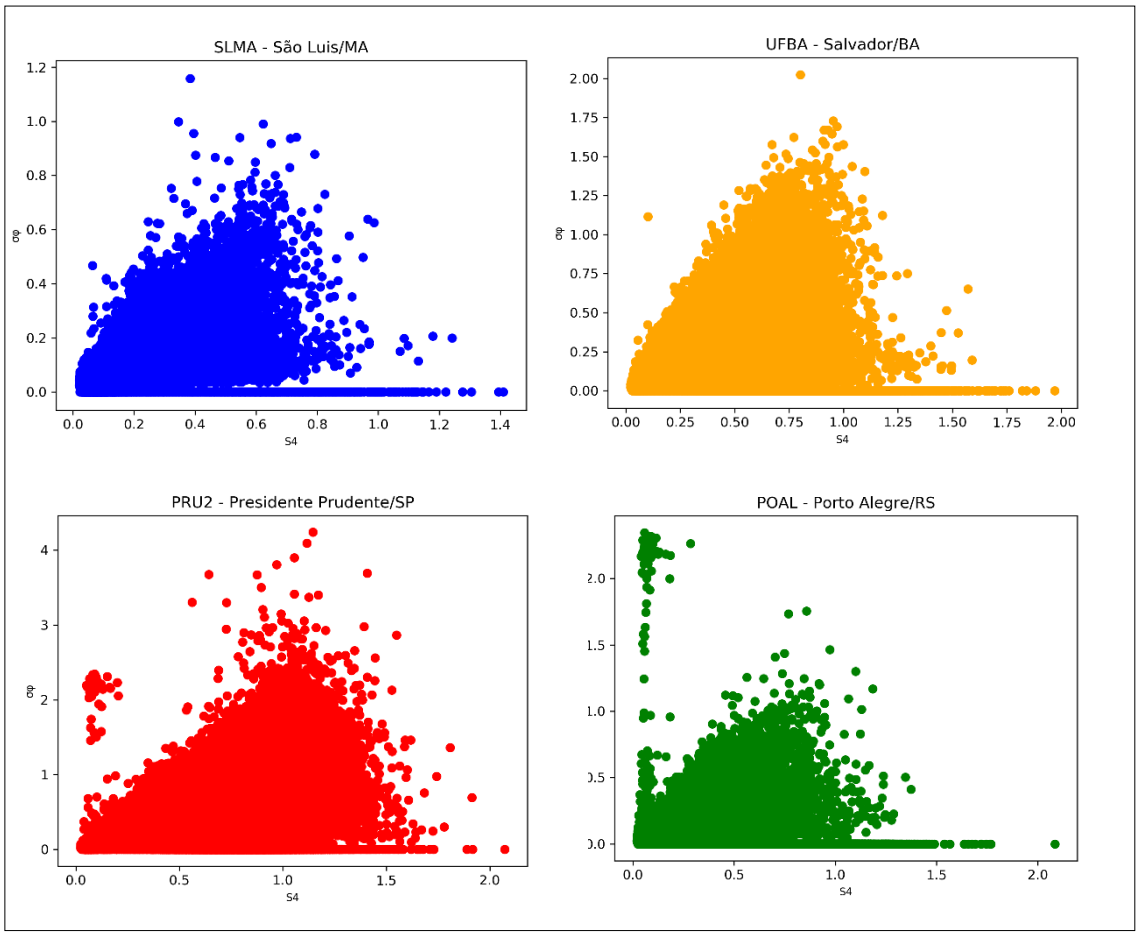
Calculou-se também o coeficiente de Pearson, que mede a relação estatística entre duas variáveis. Para o período de baixa cintilação ionosférica foi possível observar que a correlação foi de aproximadamente 0,10. Já para o período com maior ocorrência de cintilação ionosférica foi possível observar um valor de 0,86 aproximadamente.

Posteriormente expandiu-se a análise para as quatro estações utilizadas nos experimentos anteriores e algumas restrições de janelas se fizeram necessárias, para avaliar a correlação. Se tratando da variação diurna, foi selecionada a janela entre as 21 e as 4h UTC, horário que a cintilação, tanto em fase como em amplitude se mostrou mais recorrente de acordo com os experimentos da seção 6.1. Considerando a variação durante os meses do ano, também foi restrito aos meses de outubro a março, período em que ocorre mais cintilação tanto em amplitude quanto em fase, como visto na seção 6.2. Além disso, considerando a variação durante o ciclo solar, considerou-se apenas os anos com maior ocorrência de cintilação, como apresentado na seção 6.3.

Além da seleção das janelas com maior ocorrência de cintilação ionosférica, utilizou-se neste experimento apenas dados na frequência L1, da constelação no sistema GPS, com satélites com elevação acima de 25°, esta última restrição com o objetivo de minimizar os efeitos do multicaminho.

Na Figura 39 temos no eixo X os valores para a cintilação em amplitude (S_4) e no eixo Y temos os valores para cintilação em fase (σ_φ) na estação SLMA, UFBA, PRU2 e POAL.

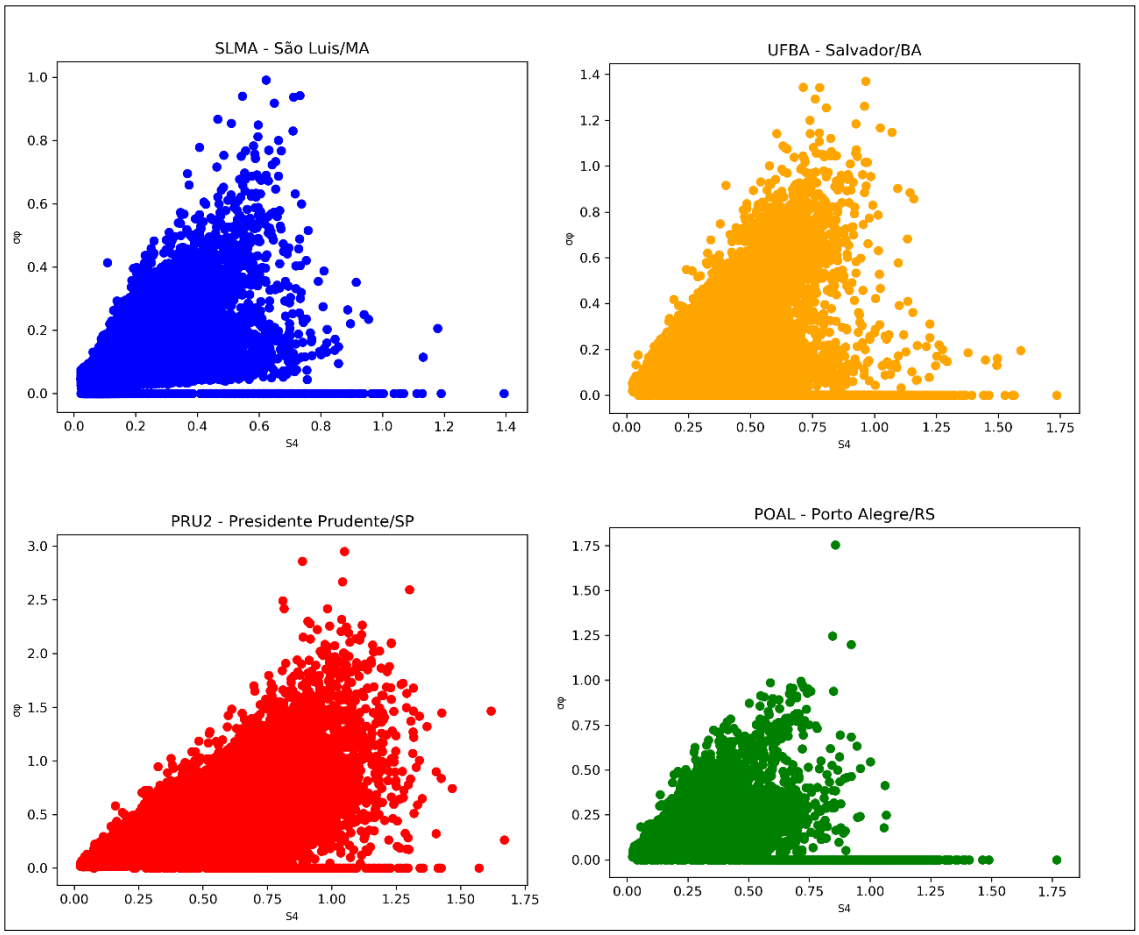
Figura 39 - Correlação entre S_4 e σ_φ - restringindo de acordo com as janelas de maior ocorrência de cintilação ionosférica - outubro a março dos anos 2013 e 2014, entre as 21h e as 4h



Na Figura 39 é possível observar que as estações que tiveram maior ocorrência de cintilação apresentaram maior correlação entre a amplitude e a fase. Também se calculou o coeficiente de correlação de Pearson (ρ) que mede a correlação entre duas variáveis, variando de -1 a 1 onde quanto mais próximo de 0, menor a correlação. A estação POAL apresentou menor correlação, com ρ = 0,35, já SLMA apresentou ρ = 0,42, por sua vez a estação UFBA mostrou que a cintilações se correlacionam, neste período, aproximadamente ρ = 0,51, porém a estação que mais obteve correlação foi a estação PRU2, com quase 0,68 de correlação.

Ainda com o objetivo de observar o comportamento da correlação entre a cintilação em fase e em amplitude, utilizou-se dados em uma janela ainda mais restrita. Dessa vez, selecionou-se dados apenas do mês de novembro do ano de 2014, entre as 21h e 4h UTC, em L1-GPS, com a máscara de elevação de 25°.

Figura 40 - Correlação entre S_4 e σ_φ - restringindo de acordo com as janelas de maior ocorrência de cintilação ionosférica - nov/2014, entre as 21h e as 4h



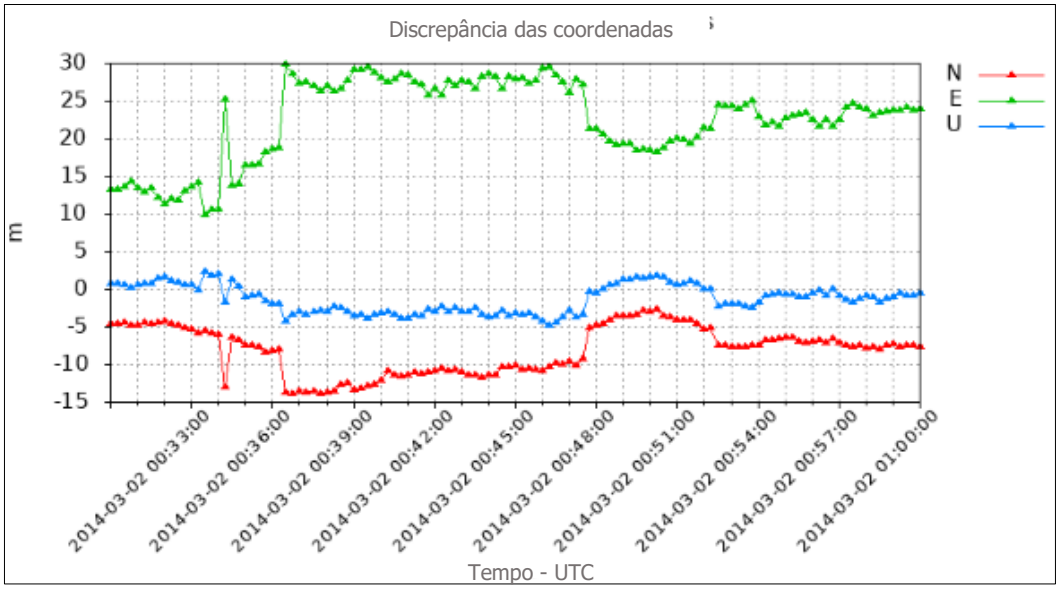
Observa-se pela Figura 40 que a correlação se mostra mais acentuada nas estações UFBA e PRU2 onde a cintilação ocorre com maior frequência e com valores mais altos. Também se calculou o coeficiente de correlação de Pearson para estas estações. Na estação POAL obteve-se menor correlação, com $\rho = 0{,}44$, já SLMA mostrou $\rho = 0{,}61$, indicando uma correlação positiva maior que 50%, por sua vez a estação UFBA mostrou que a cintilações se correlacionam, neste período, aproximadamente $\rho = 0{,}78$, porém a estação que mais obteve correlação foi a estação PRU2, com quase 0,80 de correlação, mostrando que quanto maior a ocorrência de cintilação no período analisado, maior será a correlação entre elas. Assim, podemos inferir que, quanto mais ativera a ionosfera estiver, ocorrerá cintilação de modo similar tanto para a amplitude quanto para a fase, se atentando ao fato de que a fase poderá sofrer perda de sintonia devido a propagação do sinal passar por bolhas ionosféricas.

6.6. Estudo de caso: A influência do S_4 no posicionamento

Com a finalidade de analisar a influência do S_4 no posicionamento, bem como encontrar a partir de qual valor o S_4 influencia no posicionamento, realizou-se um estudo de caso. Primeiramente uma análise com S_4 igual ou maior que 0,8.

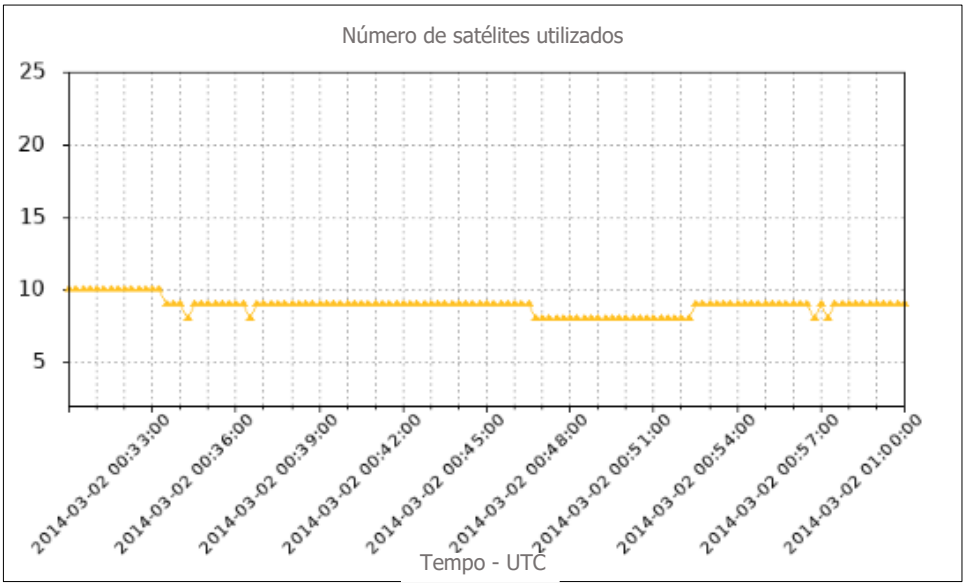
A partir daí, escolheu-se o dia 02/03/2014 entre a 0:30 e a 1:00 e realizou-se o posicionamento por ponto simples. A Figura 41 apresenta as discrepâncias, em metros, obtidas como resultado do posicionamento.

Figura 41 - Discrepâncias das coordenadas - PRU2 - Dia 02/03/2014 entre as 00:30 e as 01:00 - UTC



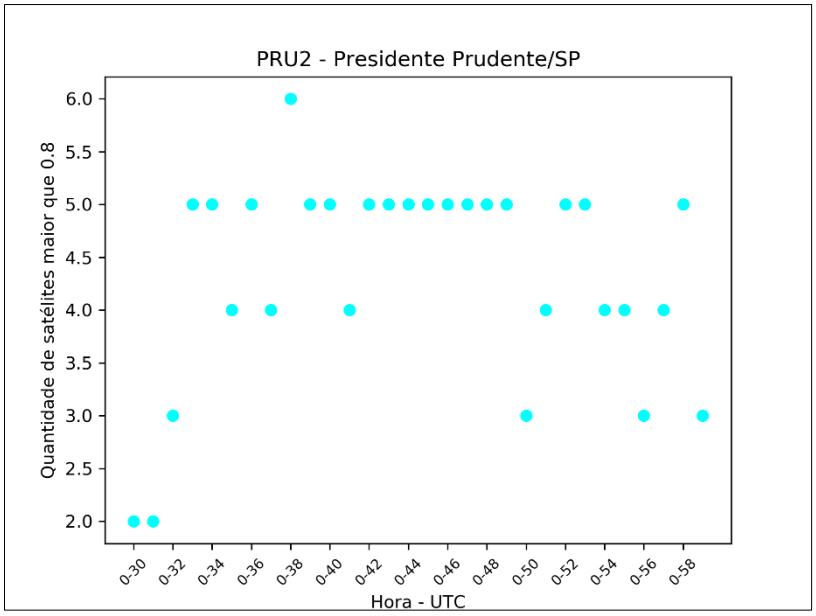
Pode-se observar na Figura 41 que entre as 00:34 e 00:47 ocorreram os maiores valores das discrepâncias no posicionamento, chegando na coordenada E a quase 30 metros; na coordenada N aproximadamente a 15m, enquanto na coordenada U tem-se aproximadamente 5 m de discrepância.

Figura 42 - Número de satélites utilizados no posicionamento - PRU2 - Dia 02/03/2014 entre as 00:30 e as 01:00 - UTC



Nota-se na Figura 42 que a quantidade de satélites utilizados no posicionamento no período crítico, ou seja, onde a discrepância foi maior se mantém em 9 satélites. Desses 9 satélites, 5 apresentam S_4 maiores que 0,80, como podemos observar na Figura 43.

Figura 43 - Quantidade de satélites com S_4 maior que 0,8 - PRU2 - Dia 02/03/2014 entre às 00:30 e as 01:00 - UTC

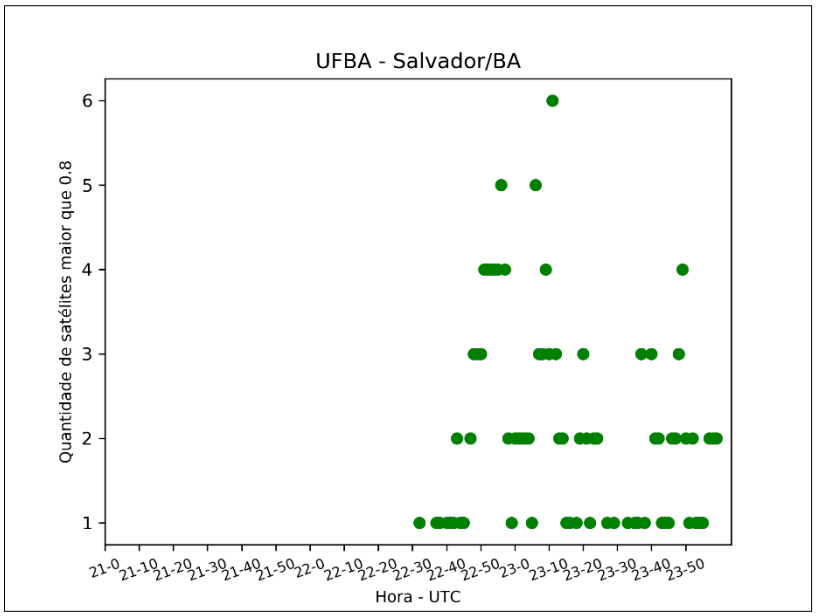


Neste primeiro exemplo, pode-se observar que de um total de 9 satélites, ao menos 55% dos satélites estiverem sob efeito da cintilação por um período constante, e o valor

de S_4 for maior ou igual a 0,8, teremos uma influência significativa no posicionamento por ponto simples.

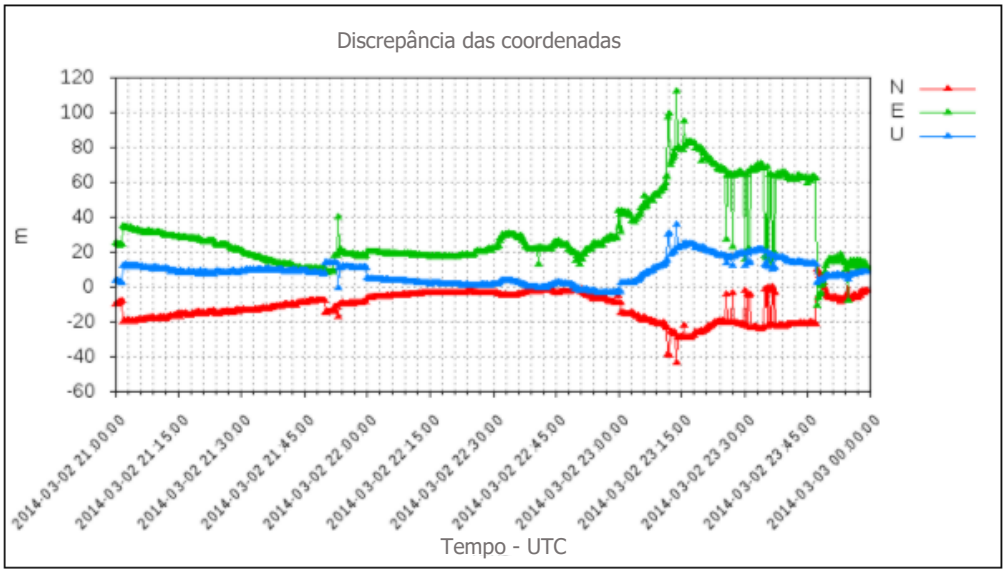
Posteriormente realizou-se um estudo para estação UFBA, que de acordo com a seção 6.4, também apresentou alta ocorrência de cintilação ionosférica. Escolheu-se o dia 02/03/2014 entre as 22:00h e as 23:59h UTC, horário em que temos ocorrência de forte cintilação, como podemos observar na seção 6.1. Ainda de acordo com os estudos apresentados nas seções 6.2 e 6.3, estamos analisando um mês que a cintilação é frequente (março) e um período de pico do ciclo solar (2014). A Figura 44 apresenta a quantidade de satélite GPSL1, com S_4 maior que 0,8 para este período.

Figura 44 - Quantidade de satélites com S_4 maior que 0,8 UFBA - Dia 02/03/2014 entre as 21:00 e as 23:59 - UTC



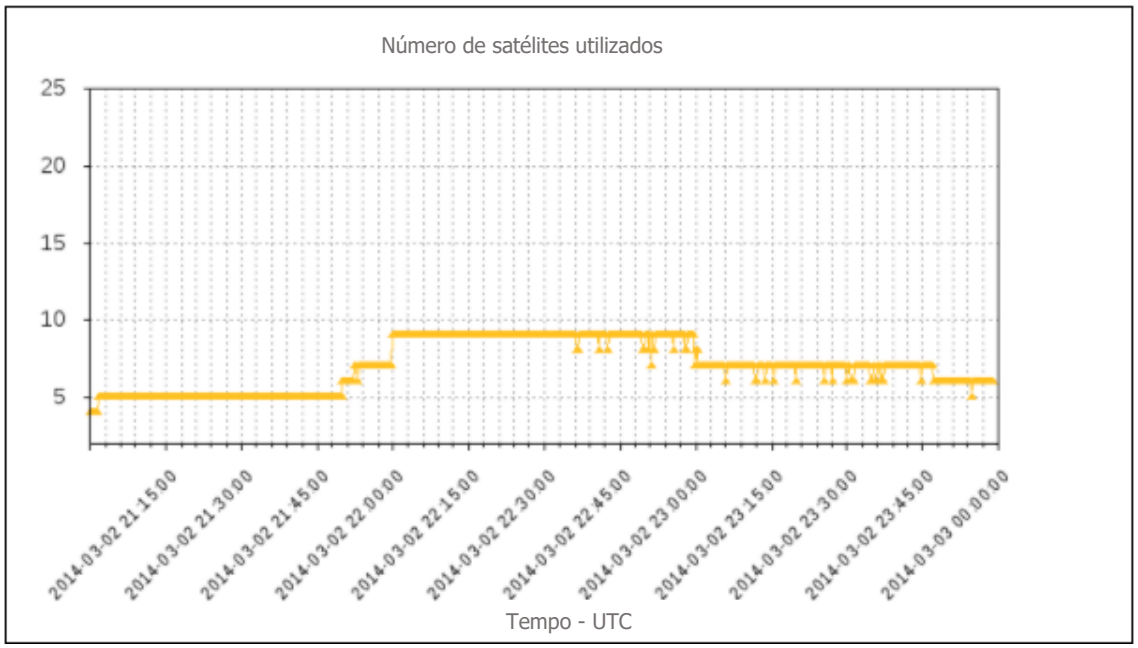
Nota-se que até, aproximadamente, as 22:27h UTC não é registrada a ocorrência de satélites com S_4 maiores que 0,8. Posterior a este horário tem-se uma variação na quantidade de satélite que apresentam cintilação maior que o limiar que está sendo analisado. A Figura 45 apresenta a discrepância das coordenadas nas 3 componentes (N,E e U), para o posicionamento por simples, no período entre as 21h e as 23:59 do dia 01/03/2014.

Figura 45 - Posicionamento por ponto - UFBA - Dia 02/03/2014 entre as 22:00 e as 23:59



A partir da Figura 45 pode-se observar que um pouco antes das 22:30h o erro no posicionamento aumentou, principalmente na componente E. Neste horário também é possível observar que começam a aparecer satélites com cintilação em amplitude maior (S_4) que 0,8. Próximo as 23:00h observa-se que o posicionamento degrada crescentemente, chegando a um erro de quase 80m na componente E e quase -40 m na componente N, e neste mesmo instante observa-se na Figura 46 variação entre 3 e 4 satélites com S_4 maior 0,8. No final do período observado, aproximadamente as 23:46h tem-se uma melhora no posicionamento com uma redução na amplitude da variação de satélites com S_4 maior que 0,8.

Figura 47 - Número de satélites utilizados no posicionamento - UFBA - Dia 02/03/2014 entre as 22:00 e as 23:59 - UTC



Neste experimento a quantidade de satálite variou entre 5 e 9 (Figura 46), sendo que nos períodos onde constatamos cintilação prejudicial ao posicionamento, utilizou-se 7 satélites para determinar a posição. Assim, novamente observa-se que quando há em torno de 50% dos satélites afetados por S4 maior que 0,8, a acurácia poderá ser degradada.

Assim, pode-se ter um ponto de partida para os próximos estudos considerando quantos satélites poderão ser afetados sem degradar o posicionamento, para que seja desenvolvido uma espécie de critério para a não realização do posicionamento, ou alertar o usuário que devido a cintilação o posicionamento poderá ser afetado.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

De acordo com as análises e o levantamento bibliográfico realizado, foi possível atingir os principais objetivos propostos para esta pesquisa. Foram realizadas análises a respeito dos dois índices comumente utilizados para caracterizar a cintilação ionosférica, bem como foi utilizado das variações da ionosfera já conhecidas para servir como embasamento dos resultados obtidos. Se tratando do levantamento bibliográfico, realizou-se uma revisão passando pelos principais temas que cercam o estudo da cintilação ionosférica, tais como: posicionamento GNSS (sistemas e métodos), características da ionosfera, distúrbio magnéticos, anomalias que se encontram na região brasileira bem como os efeitos causados pela ionosfera nos sinais GNSS.

A partir das análises realizadas foi possível observar que a cintilação ionosférica se apresenta de modo intenso em grande parte da região brasileira, podendo assim afetar as atividades que se utilizam do posicionamento GNSS, como agricultura, navegação marítima, navegação aérea entre outras aplicações.

Observou-se que a variação da cintilação de amplitude e fase é altamente correlacionada com o fluxo de atividade solar, ou seja, quanto maior o fluxo solar maior a probabilidade de ocorrência de cintilação ionosférica. Ainda foi possível observar que as irregularidades ionosféricas também variam de acordo com o aumento do fluxo solar. Sendo assim, dentro do período estudado, os anos de 2013 e 2014 apresentaram maior ocorrência de cintilação em amplitude e em fase, já 2018 apresentou menor ocorrência de cintilação ionosférica.

Para a variação sazonal foi encontrado que no período de abril a agosto praticamente não ocorreu cintilação classificada como moderada, forte ou saturada. No mês de setembro ocorre um pequeno aumento, já nos meses de outubro a março, observou-se que a ocorrência de cintilação ionosférica foi maior. Observou-se também que o mês de novembro, em geral, possui maior ocorrência de cintilação ionosférica, que correlaciona com o período de aumento das bolhas ionosféricas. Ainda houve outro pico de variação sazonal em março, que também se correlaciona com o período de maior ocorrência de bolhas ionosféricas. Já de abril a setembro, podemos observar que praticamente não houve cintilação, o que apresenta correlação com a presença de bolhas ionosférica. A respeito da cintilação em fase, observou-se o mesmo comportamento que na cintilação em amplitude: outubro a março com maior ocorrência de cintilação

ionosférica em fase, setembro um pequeno aumento e de abril a agosto período com menor ocorrência de cintilação.

Se tratando da variação diurna, foi possível observar que a variação da cintilação em amplitude é similar a variação da cintilação em fase. Os maiores picos da cintilação em amplitude foram encontrados entre as 22h e a 4h do UTC e a cintilação em fase novamente apresentou picos no mesmo intervalo, divergindo apenas na magnitude. Foi possível também observar que as estações mais a leste tiveram acréscimo na ocorrência de cintilação acontece primeiro do que naqueles mais a oeste onde temos o acréscimo na ocorrência um pouco mais tarde, coincidindo com o terminador do dia, que por sua vez ocorre no mesmo sentido da geração das irregularidades ionosféricas. Neste contexto, é importante ressaltar que após a geração das irregularidades, as bolhas ionosféricas se deslocam no sentido de oeste para leste, paralela ao equador magnético.

Quanto a variação de acordo com a latitude das estações, observou-se maior ocorrência de S_4 nas estações UFBA, PRU2 enquanto nas estações SLMA e POAL a porcentagem de ocorrência foi menor. Isso ocorre pois tais estações se encontram na crista da anomalia, SLMA, ou fora dela, POAL, enquanto as outras estações se encontram na região mais afetada pela EIA. Se tratando da cintilação em fase, pode-se observar que o padrão se repete: UFBA e PRU2 apresentam maior ocorrência e SLMA e POAL apresentaram menores ocorrências, que também pode ser correlacionado a localização em relação a EIA.

Observou-se também que a para valores menores de S_4, a frequência L5 apresenta menor probabilidade de ocorrência, quando comparada com L2 e L1 e quando a cintilação fica mais forte, isto é, o valor de S_4 e σ_ϕ aumenta, L5 apresenta maior probabilidade de ocorrência que as demais frequências. Logo, podemos concluir que os efeitos das irregularidades ionosféricas sobre os sinais GNSS são diferentes para cada frequência, sendo L5 mais susceptível a ocorrência de cintilação ionosférica moderada ou forte.

Sobre a correlação entre a cintilação em amplitude e a cintilação em fase, foi possível observar que a estação PRU2, aproximadamente 0,80%, apresentou maior correlação, seguida da estação UFBA, SLMA e POAL, sendo altamente correlacionado com as estações de maior ocorrência de cintilação em fase.

O estudo de caso da influência do S_4, trouxe que quando ocorre cintilação em amplitude maior que 0,8 em torno de 50% dos satélites, o posicionamento é severamente

afetado e a acurácia é degradada. Ainda neste experimento foi possível observar que as análises da ocorrência de cintilação ionosférica se mostraram assertivas, pois o período estudado está entre as 22h e a 4h UTC, entre outubro a março, nos anos de pico do ciclo solar (2013 e 2014) e nas estações afetadas pela anomalia de ionização equatorial. Ainda se ressalta que mais estudos deverão ser feitos utilizando outras estações, com outros limiares, bem como utilizando-se a cintilação em fase como objeto de estudo.

Finalmente, ressalta-se a importância de estudos relacionados a atmosfera, mais precisamente a ionosfera, para que os efeitos da cintilação ionosférica e do clima espacial nos sinais de rastreio sejam conhecidos e modelados, evitando assim futuros problemas durante operações que envolvam o posicionamento, como na agricultura, automação de veículos (pessoais ou até mesmo de carga), ou ainda na aviação civil, sendo assim imprescindível o conhecimento do comportamento da cintilação ionosférica.

No que diz respeito as recomendações futuras para a climatologia, sugere-se seccionar a análise para os sistemas GNSS operantes, expandir a análise para outros ângulos de elevação possibilitando uma visão global da influência da cintilação no posicionamento. Também recomenda-se verificar com maiores detalhes a correlação entre a cintilação em fase e em amplitude, utilizando-se de outras métricas estatísticas, bem como seccionar os dados de acordo com as variações diurnas apresentadas neste trabalho, expandir a análise para as demais frequências e demais sistemas GNSS, ou ainda correlacionar com a ocorrência de irregularidades ionosféricas.

Para o posicionamento, é recomendado expandir a análise para as demais regiões, bem como analisar outros limites de cintilação em amplitude bem como de cintilação em fase, para que se estabeleça um valor que caracterize a influência da cintilação nos sinais GNSS e se tenha a quantidade máxima de satélite que seja influenciado pela cintilação e não afete o posicionamento.

Ao final desse trabalho, ressalta-se a importância da manutenção e aprimoramento de uma rede com a finalidade de estudar a cintilação ionosférica na região brasileira, como é o caso da rede INCT- NavAer durante um longo período para que se possa tirar conclusões precisas sobre a cintilação e os efeitos no posicionamento, bem como estimar e elaborar método que maximizem a acurácia no posicionamento que é perdida devido a ionosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A; I. S. BATISTA; H. A. SOBRAL. ***A New Aspect of Magnetic Declination Control on Equatorial Spread-F and F-Region Dynamo***. J. Geophys. Res., (AlO), 14897-14904, 1992.

ABDU, M. A. ***Outstanding problems in the equatorial ionosphere – thermosphere electrodynamics relevant to spread F***., Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 63, n. 9, p. 869-884, 2001.

ABREU, R; GONZÁLEZ, A., ZOETEWEIJ, P; VAN GEMUND, A. ***Automatic software fault localization using generic program invariants***. In Proc. SAC08, Fortaleza, Brazil, 2008.

ABREU, A.J. **Estudo do papel das ondas planetárias e dos distúrbios ionosféricos na geração de irregularidades ionosféricas equatoriais**. 2012. 193 f. Tese (Doutorado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos.

ALFONSI, L.; SPOGLI L.; FRANCESCHI, G.; ROMANO V.; AQUINO, M.; DODSON, A. MITCHELL, C. N. ***Bipolar climatology of GPS ionospheric scintillation at solar minimum.*** Radio Science, vol 46, 2011.

BARTELS J. ;HECK N. H.; JOHNSTON F., ***The three-hour-range index measuring geomagnetic activity***, J. Geophys. Res., 44, 411-, 1939.

BEIDOU - ***Beidou Navigation Satellite System***. Disponível em: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> Acesso em 16 de junho de 2019.

BOUGARD, B.; SLEEWAEGEN J.M.; SPOGLI, L.; SREEJA V. V.; MONICO, J.F.G. **CIGALA:** ***Challenging the Solar Maximum in Brazil with PolaRxS***, Proceeding of the ION GNSS 2011, Portland, Oregon.

CANDIDO, C. M. N. **Estudos de irregularidades no plasma da camada ionosférica F equatorial e de baixas latitudes no setor longitudinal brasileiro**. 2008.258f f. Tese (Geofísica Espacial) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE, São José dos Campos

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para uso em Posicionamento com Receptores de uma Frequência.** Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

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

DAVIES, K**.** ***Ionospheric Radio***. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 582p.

DUNGEY, J. W. - ***Convective diffusion in the equatorial F region***. J Atmos Terr hyx. v9, P304, 1956

EC - European Commission . ***European GNSS (Galileo) open service ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users***. 2016. Disponível em: <https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo_Ionospheric_Model.pdf>
Acesso: 10 de março fr 2021.

ESA - European Space Agency. ***Galileo Satellites.*** Disponível em: <https://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_satellites> Acesso em 16 de junho de 2019.

GEMAEL, C. ANDRADE, J. B. **Geodésia Celeste**. Curitiba: Editora UFPR; 2004.

HAASE, J. S.; DAUTERMANN, T.; TAYLOR, M. J.; CHAPAGAIN, N.;CALAIS,E.;PAUTET, D. ***Propagation of plasma bubbles observed in Brazil from GPS and airglow data. Advances in Space Research***, v. 47, n. 10, p. 1758-1776, 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, A. ***Physics***. 4 Ed., New York: John Wiley &Sons Inc., Volume II, 1992.

HARTMANN, G.K.; LEITINGER, R.**.** ***Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz***. Bulletin Géodésique. Paris, v.58, n.2, p.109-136, 1984.

HARTMANN, G. A.; PACCA, I. G**.. *Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly***. An. Acad. Bras. Ciênc., Rio de Janeiro, v. 81, n. 2, 2009.

HEGARTY, C.; EL-ARINI, M. B.; KIM, T.; ERICSON, S. ***Scintillation modeling for GPS-Wide Area Augmentation System receivers***. Radio Science, vol. 36, n. 5, 2001. pp. 1221-1231.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J**.. *Global Positioning System Theory and Practice***. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1993.

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

IGS. ***International GNSS Service - Products***. Disponível em: <https://www.igs.org/products>. Acesso em: 16 de junho de 2019.

KELLEY, M.C.; ***The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics. International Geophysics Series***, vol 43. San Diego: Academic Press, 2006.

KINTNER, P. M., LEDVINA, B. M. PAULA, E. R., ***GPS and ionospheric scintillations***. Space Weather, 5, S09003, doi:10.1029/2006SW000260, 2007.

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

LINTY, N; FARASIN, A; FAVENZA, A; DOVIS, F. ***Detection of GNSS Ionospheric Scintillation Based on Machine Learning Decision Tree.*** IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems vol. 55, no. 1, 2019. DOI: 10.1109/TAES.2018.2850385.

LISIRD - Lasp Interactive Solar Irradiance Datacenter. ***Penticton Solar Radio Flux at 10.7cm, Time Series*** Disponível em: <https://lasp.colorado.edu/lisird/data/noaa_radio_flux/> Acesso em 12 de fevereiro de 2021.

MATSUOKA, T. M. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS: Avaliação na região brasileira.** Tese (Doutorado Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente, 2007.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. **Posicionamento por GPS na região brasileira durante a intensa tempestade geomagnética de 29 de outubro de 2003**. Pesquisas em Geociências, v.35, p.3-19, 2008.

McNAMARA L.F. ***The ionosphere: communications, surveillance and direction finding.*** Florida: Krieger Publishing Company, 1991.

MENDONÇA, M. A. M. **Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013.

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

MORAES, A. O., E. COSTA, M. A. ABDU, F. S. RODRIGUES, E. R. DE PAULA, K. OLIVEIRA E W. J. PERRELLA. ***The variability of low-latitude ionospheric amplitude and phase scintillation detected by a triple-frequency GPS receiver.*** Radio Sci.,52, 439–460.2017.DOI:10.1002/2016RS006165.

MUELLA, M. T. A. H., DUARTE-SILVA, M. H., MORAES, A. O., DE PAULA, E. R., DE REZENDE, L. F. C., ALFONSI, L., AND AFFONSO, B. J.: ***Climatology and modeling of ionospheric scintillations and irregularity zonal drifts at the equatorial anomaly crest region***, Ann. Geophys., 35, 1201–1218, https://doi.org/10.5194/angeo-35-1201-2017, 2017.

MUELLA, M. T. A. H.; DE PAULA, E. R.; KANTOR, I. J.; REZENDE, L. F. C.; SMORIGO, P. F**.** ***Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum – magnetic quiet and disturbed conditions***. Advances in Space Research, v. 43, n. 12, p. 1957-1973, June 2009.

NASA/GSFC – ***Goddard Space Flight Center / National Aeronautics And Space Administration*** - Disponível em: <http://gsfc.nasa.gov/> Acesso em 05 de jul de 2019.

NASA/SoHO – S***olar And Heliosphere Observatory/National Aeronautics And Space Administration*** **.** Disponível em: < http://sohowww.nascom.nasa.gov/> Acesso em 1 de julho de 2019.

PEREIRA, V. A. S**. Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS: em tempo real e pós-processado**. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente

PEREIRA, V. A. S. **Investigação da usabilidade do GBAS no Brasil**. 2018. 250 f. Tese (Doutorado Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente

PICQUENARD, A.. ***Propagação das ondas radioelétricas nos meios naturais.*** Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos S.A., 1974.

PIERSANTI, M; ALBERTI, T; BEMPORAD, A; BERRILLI, F; BRUNO, R; CAPPARELLI, V; CAROBONE, V; CESARONI, C; CONSOLINI, G; CRISTALDI, A; CORPO, A; MORO, D; MATTEO, S; ERMOLLI, I; FINESCHI, S; GIANNATTASIO, F; GIORGI, F; GIOVANELLI, L; GUGLIELMINO S; LAURENZA, M; LEPRETI, F; MARCUCCI, M. F; MARTUCCI, M; MERGE, M; PEZZOPANE, M; PIETROPAOLO, E; ROMANO, P; SPARVOLI, R; SPOGLI, L; STANGALINI, M; VECCHIO, A; VELLANTE, M; VILLANTE, U; ZUCCARELLO, F;HEILIG, B; REDA, J; LICHTENBERGER, J. ***Comprehensive Analysis of the Geoeffective Solar Event of 21 June 2015: Effects on the Magnetosphere, Plasmasphere, and Ionosphere Systems***. Solar Physics, vol 292, 2017.

PIMENTA, A. A**. Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas d e plasma na região tropical**. 2003. 194 f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos

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

SAHITI, K.; SRIDHAR M.; KOTAMRAJU S. K.; KAVYA, K. C.; SIVAVARAPRAS G.; RATNAM D. V.; DEEPTHI C. ***Characteristics of ionospheric scintillation climatology over Indian low-latitude region during the 24th solar maximum.*** Geodesy and Geodynamics, 2018.

SANTOS, P. M. T**. Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileir*a.*** 2001. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital trosposférico utilizando GPS.** Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente, 2001. 167p.

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

SILVA, H. A.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; MARQUES, H. A.; DE FRANSCESCHI, G.; DODSON, A. ***Stochastic modelling considering ionospheric scintillation effects on GNSS relative and point positionin***g. Advances in Space Research. v.45, 2010. p.1113 - 1121.

SOARES, AP. **Monitoração de anomalias em comunicações via satélite**. In: XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, Brasil, 21 a 26 de outubro, 2001.

SOUZA, A. L. C. **Cálculo da velocidade de deriva das bolhas ionosféricas a partir de observações GNSS**. 2019, 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estatual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Presidente Prudente.

SOUZA, J. S.; ALVES, D. B. M.; VANI, B. C. **Estudo do comportamento da cintilação ionosférica em diferentes regiões brasileiras e seu impacto no posicionamento GNSS.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 67, n. 1, 2015

SPOGLI, L; ALFONSI, L; ROMANO, V; DE FRANCESCHI G; MONIGO, J.F.G; 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, 2013.

SREEJA, V.; AQUINO M. ***Statistics of ionospheric scintillation over European high latitudes.*** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol 120 pg 96-101, 2014.

STRANGEWAYS, H, .J. ***Determining scintillation effects on GPS receivers, in Ionospheric Effects***. Symposium IES2008, Alexandria, Virginia, USA, 13-15, 2008.

TEUNISSEN, P. J. G. MONTENBRUCK, O***. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems***. Switzerland, Springer International Publishing. 1327p. e-ISBN: 978-3-319-42928-1.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MON. ICO, J. F. G. ***Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR Query Tool***. Computers & Geosciences, 2017.

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